

PENGARUH VARIABEL *HELIX ANGLE* DAN *AXIAL DEPTH OF CUT* PADA PROSES *END MILLING* TERHADAP *SURFACE ROUGHNESS* ALUMINIUM

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ARDA NUR FAUZAN
NIM. 145060200111009

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIABEL *HELIX ANGLE* DAN *AXIAL DEPTH OF CUT* PADA PROSES *END MILLING* TERHADAP *SURFACE ROUGHNESS* ALUMINIUM

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ARDA NUR FAUZAN
NIM. 145060200111009

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 11 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.
NIK. 2016058607031001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 1974093 0200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Variabel *Helix Angle* dan *Axial Depth of Cut* Pada Proses *End Milling* Terhadap *Surface Roughness* Aluminium

Nama Mahasiswa : Arda Nur Fauzan
NIM : 145060200111009
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Manufaktur

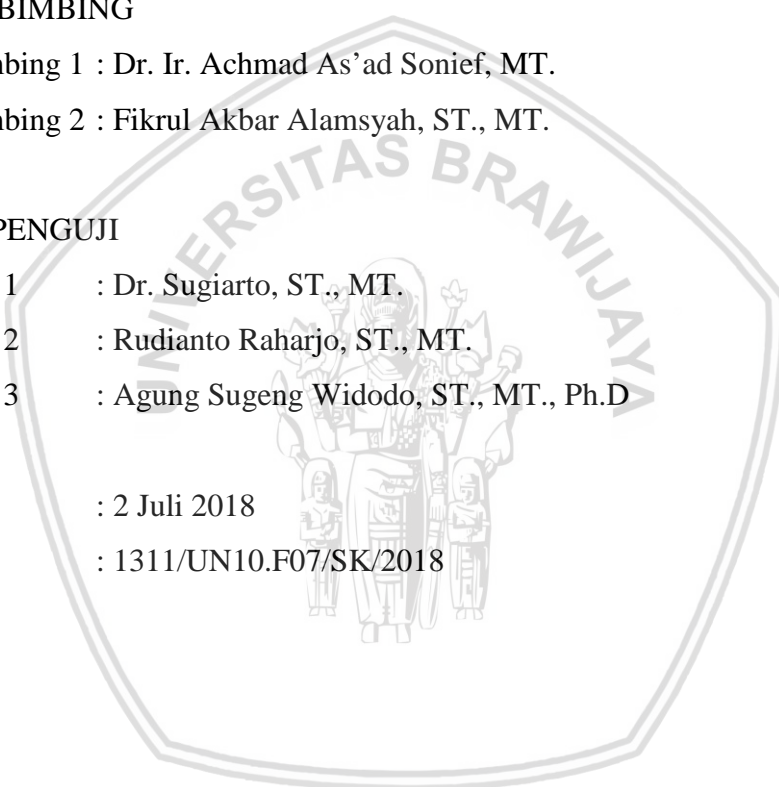
KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
Dosen Pembimbing 2 : Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Sugiarto, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Rudianto Raharjo, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D

Tanggal Ujian : 2 Juli 2018
SK Penguji : 1311/UN10.F07/SK/2018



TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 088/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

ARDA NUR FAUZAN

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH VARIABEL *HELIX ANGLE* DAN *AXIAL DEPTH OF CUT* PADA PROSES *END MILLING* TERHADAP *SURFACE ROUGHNESS* ALUMINIUM

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

13 JUL 2018

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Bjarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 16 Juli 2018

Mahasiswa



Arda Nur Fauzan

NIM. 145060200111009

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Data Pribadi

Nama : Arda Nur Fauzan
Tempat, tanggal lahir : Malang, 22 Juni 1996
Jenis kelamin : Laki-laki
Agama : Islam
Alamat : Jl. Nusa Sari III No. 8 Komplek Taman Citeureup Cimahi
No. HP : 082247728701
Email : ardanurf@gmail.com

Riwayat Pendidikan

Tahun 2002 sampai dengan 2008 : SD Negeri Banjarsari 2 Bandung
Tahun 2008 sampai dengan 2011 : SMP Negeri 5 Bandung
Tahun 2011 sampai dengan 2014 : SMA Negeri 3 Bandung
Tahun 2014 sampai dengan 2018 : Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya

**Skripsi ini saya dedikasikan untuk keluarga,
yang selalu menginspirasi dan memberikan dukungan.**



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variabel *Helix Angle* dan *Axial Depth of Cut* Pada Proses *End Milling* Terhadap *Surface Roughness* Aluminium”** dengan baik.

Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Setelah melalui berbagai tahapan, akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk segala dukungannya pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D, selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D, selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Kepala Program Studi S1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE, selaku Ketua Kelompok Jabatan Fungsional Teknik Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT., selaku pembimbing I skripsi dan Kepala Laboratorium Otomasi Manufaktur yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT., selaku pembimbing II skripsi dan Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
7. Segenap staf pengajar khususnya dosen-dosen dan jajaran staf karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
8. Bapak Arif Samsu dan Ibu Ida Fitri Rahaju selaku orang tua yang selalu mendidik dan mendoakan saya hingga dewasa.
9. Saudari kandung saya Arida Safira yang selalu memberi semangat dan dukungannya dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Bapak Moekali dan Ibu Siti Djamilah selaku kakek dan nenek yang selalu membimbing dan mendoakan saya selama saya menempuh kuliah di Kota Malang.
11. Teman satu angkatan Mesin 2014 yang selalu memberikan semangat dan bantuan atas skripsi ini.

12. Rekan-rekan Aerokreasi FT Universitas Brawijaya tempat saya memimpin organisasi.
13. Rekan-rekan AIESEC UB tempat meningkatkan kepemimpinan.
14. Rekan-rekan Urban Malang tempat saya belajar bersama mahasiswa dari Kota Bandung.
15. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca terhadap skripsi yang telah disusun demi perbaikan penelitian seperti ini di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut maupun pihak yang membutuhkan.

Malang, Juli 2018

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
SUMMARY	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Proses Manufaktur	5
2.3 Permesinan	5
2.4 <i>Computer Numerical Control (CNC)</i>	6
2.5 <i>Milling</i>	7
2.5.1 Jenis Operasi <i>Milling</i>	7
2.5.2 Parameter Permesinan <i>Milling</i>	9
2.6 Variabel <i>Helix Angle</i>	11
2.7 Getaran	12
2.7.1 <i>Regenerative Chatter</i>	13
2.7.2 Resonansi	15
2.8 <i>Surface Roughness</i>	16
2.9 Kerangka Pemikiran	18
2.9.1 Pengaruh Variabel <i>Helix Angle</i> terhadap <i>Surface Roughness</i>	18
2.9.2 Pengaruh <i>Depth of Cut</i> terhadap <i>Surface Roughness</i>	18
2.10 Hipotesis	19
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Metode Penelitian	21

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.3 Variabel Penelitian	21
3.4 Alat Penelitian	22
3.5 Dimensi Benda Kerja	26
3.6 Skema Penelitian	27
3.7 Prosedur Penelitian	27
3.8 <i>Flowchart</i>	30
3.9 Analisis Statistik	33
3.9.1 Uji T	33
3.9.2 Analisis Regresi	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Data Hasil Penelitian	35
4.2 Uji T Pengaruh Variabel <i>Helix Angle</i> terhadap <i>Surface Roughness</i> (Ra)	35
4.3 Analisis Regresi	37
4.3.1 Analisis Regresi Pengaruh <i>Axial Depth of Cut</i> terhadap <i>Surface Roughness</i> (Ra) pada Pahat Normal <i>Helix Angle</i>	38
4.3.2 Analisis Regresi Pengaruh <i>Axial Depth of Cut</i> terhadap <i>Surface Roughness</i> (Ra) pada Pahat Variabel <i>Helix Angle</i>	38
4.4 Grafik dan Pembahasan	40
4.4.1 Grafik dan Pembahasan Pengaruh Variabel <i>Helix Angle</i> dan <i>Axial Depth of Cut</i> terhadap <i>Surface Roughness</i> (Ra)	40
4.4.2 Grafik dan Pembahasan <i>Surface Roughness</i> (Ra), Amplitudo <i>Displacement</i> , dan Spektrum Frekuensi pada <i>End Milling</i> Menggunakan Variabel <i>Helix Angle</i> dan Normal <i>Helix Angle</i>	41
BAB V PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Rancangan Tabel Uji T.....	33
Tabel 3.2	Rancangan Tabel Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi	34
Tabel 3.3	Rancangan Tabel Anova.....	34
Tabel 4.1	Data <i>Surface Roughness</i> (Ra) Hasil Penelitian	35
Tabel 4.2	Uji T <i>Axial Depth of Cut</i> 0,6 mm	36
Tabel 4.3	Uji T <i>Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm	36
Tabel 4.4	Uji T <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm	36
Tabel 4.5	Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Normal <i>Helix Angle</i>	38
Tabel 4.6	Anova Regresi Normal <i>Helix Angle</i>	38
Tabel 4.7	Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Variabel <i>Helix Angle</i>	38
Tabel 4.8	Anova Regresi Variabel <i>Helix Angle</i>	39
Tabel 4.9	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Normal <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 0,6 mm, Sampel 1-5	46
Tabel 4.10	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Variabel <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 0,6 mm, Sampel 1-5	46
Tabel 4.11	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Normal <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm, Sampel 1-5	50
Tabel 4.12	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Variabel <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm, Sampel 1-5	50
Tabel 4.13	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Normal <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm, Sampel 1-5	54
Tabel 4.14	Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo <i>Displacement</i> , dan <i>Surface Roughness</i> (Ra) Pahat Variabel <i>Helix Angle</i> , <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm, Sampel 1-5	54

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Mesin CNC	6
Gambar 2.2	Proses <i>Milling</i>	7
Gambar 2.3	Dua jenis operasi <i>milling</i> , gambar (a) <i>Peripheral milling</i> dan gambar (b) <i>Face milling</i>	8
Gambar 2.4	Contoh <i>peripheral milling</i> : (a) <i>Slab milling</i> , (b) <i>Slotting / slot milling</i> (c) <i>Side milling</i> , (d) <i>Straddle milling</i> , dan (e) <i>Form milling</i>	8
Gambar 2.5	Contoh dari operasi <i>face milling</i> : (a) <i>Conventional face milling</i> , (b) <i>Partial face milling</i> , (c) <i>End milling</i> , (d) <i>Profile milling</i> , (e) <i>Pocket milling</i> , dan (f) <i>Surface contouring</i>	9
Gambar 2.6	<i>Helix angle</i> pada <i>end mill</i>	11
Gambar 2.7	Normal <i>helix angle</i> (kiri) dan variabel <i>helix angle</i> (kanan).....	11
Gambar 2.8	<i>Chatter loop</i>	13
Gambar 2.9	<i>Chatter</i> dengan <i>instantaneous chip thickness</i> yang bervariasi.	14
Gambar 2.10	<i>Chipload</i> yang memiliki beda fase <i>completely out of phase</i>	15
Gambar 2.11	<i>Surface texture</i> yang terbagi menjadi <i>surface waviness</i> dan <i>surface roughness</i>	16
Gambar 3.1	Mesin <i>milling</i> TU CNC-3A	22
Gambar 3.2	<i>Surface roughness tester</i> SJ-301.....	23
Gambar 3.3	Pahat dengan normal <i>helix angle</i> 40°	23
Gambar 3.4	Pahat dengan variabel <i>helix angle</i> 40°/42°	24
Gambar 3.5	<i>Vibration meter</i>	24
Gambar 3.6	<i>Height gauge</i>	25
Gambar 3.7	<i>Laptop</i> dengan <i>software</i> LabView 2013.....	25
Gambar 3.8	<i>Stopwatch</i> pada <i>handphone</i>	25
Gambar 3.9	Benda kerja Aluminium Alloy 2011	26
Gambar 3.10	Dimensi benda kerja aluminium (mm)	26
Gambar 3.11	Skema penelitian.....	27
Gambar 3.11	<i>Flowchart</i> penelitian.....	32
Gambar 4.1	Grafik hasil analisis regresi pengaruh variabel <i>helix angle</i> dan <i>axial depth of cut</i> terhadap <i>surface roughness</i> (Ra)	40

Gambar 4.2	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm	43
Gambar 4.3	Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm.....	43
Gambar 4.4	<i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm	43
Gambar 4.5	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm.....	44
Gambar 4.6	Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm.....	44
Gambar 4.7	<i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 0,6 mm	44
Gambar 4.8	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm	47
Gambar 4.9	Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm.....	47
Gambar 4.10	<i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm	47
Gambar 4.11	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm.....	48
Gambar 4.12	Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm	48
Gambar 4.13	<i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,2 mm	48
Gambar 4.14	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm	51
Gambar 4.15	Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm.....	51
Gambar 4.16	<i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat normal <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm	51
Gambar 4.19	Grafik spektrum frekuensi pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm.....	52

Gambar 4.17 <i>Surface roughness</i> (Ra) pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm	52
Gambar 4.18 Grafik amplitudo <i>displacement</i> pada <i>end milling</i> menggunakan pahat variabel <i>helix angle</i> dengan <i>axial depth of cut</i> 1,8 mm.....	52



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Uji T Pahat Normal *Helix Angle* dan Variabel *Helix Angle*
- Lampiran 2 Analisis Regresi Pahat Normal *Helix Angle*
- Lampiran 3 Analisis Regresi Pahat Variabel *Helix Angle*
- Lampiran 4 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Normal *Helix Angle* Axial Depth of Cut 0,6 mm
- Lampiran 5 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Normal *Helix Angle* Axial Depth of Cut 1,2 mm
- Lampiran 6 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Normal *Helix Angle* Axial Depth of Cut 1,8 mm
- Lampiran 7 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Variabel *Helix Angle* Axial Depth of Cut 0,6 mm
- Lampiran 8 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Variabel *Helix Angle* Axial Depth of Cut 1,2 mm
- Lampiran 9 Grafik *Surface Roughness*, *Amplitudo Displacement*, dan Spektrum Frekuensi Pahat Variabel *Helix Angle* Axial Depth of Cut 1,8 mm
- Lampiran 10 Produk Permesinan Pahat Normal *Helix Angle*
- Lampiran 11 Produk Permesinan Pahat Variabel *Helix Angle*
- Lampiran 12 *Software* LabView 2013
- Lampiran 13 Pengaturan *Surface Roughness Tester*
- Lampiran 14 Katalog Pahat Normal *Helix Angle*
- Lampiran 15 Katalog Pahat Variabel *Helix Angle*
- Lampiran 16 Uji Komposisi

RINGKASAN

Arda Nur Fauzan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2018, Pengaruh Variabel *Helix Angle* dan *Axial Depth of Cut* Pada Proses *End Milling* Terhadap *Surface Roughness* Aluminium, Dosen Pembimbing: Achmad As'ad Sonief dan Fikrul Akbar Alamsyah.

Perkembangan industri manufaktur dengan ditemukannya mesin CNC menjadikan produktivitas yang semakin tinggi. Kemajuan mesin CNC masih memiliki permasalahan dalam *chatter* yang dapat menyebabkan kerusakan pada permukaan produk permesinan. *Chatter* merupakan getaran permesinan yang terjadi akibat tidak stabilnya proses permesinan. Salah satu jenis *chatter* dalam permesinan yang paling merusak adalah resonansi. Pahat variabel *helix angle* memiliki variasi *pitch angle*, sehingga pahat variabel *helix angle* menghasilkan *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan dan dapat digunakan untuk mencegah dan mengendalikan resonansi. *Axial depth of cut* sebagai salah satu parameter penting permesinan memiliki peran penting pada *chatter*. Makalah skripsi ini bertujuan untuk meneliti pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* terhadap *surface roughness* sebagai salah satu parameter kualitas produk permesinan. Operasi permesinan yang digunakan pada penelitian ini adalah *end milling*. Pahat variabel *helix angle* yang digunakan adalah 40° / 42° . *Axial depth of cut* yang digunakan sebagai variabel bebas adalah 0,6 mm, 1,2 mm, dan 1,8 mm dengan *spindle speed* 600 rev/min. Hasil penelitian didapat variabel *helix angle* menghasilkan rata-rata *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah pada setiap level *axial depth of cut*, yaitu 0,390 μm ; 0,469 μm ; 0,543 μm , dibandingkan pahat normal *helix angle*, yaitu 1,150 μm ; 1,558 μm ; 1,633 μm . Korelasi peningkatan *axial depth of cut* terhadap *surface roughness* (Ra) pada pahat variabel *helix angle* memiliki persamaan regresi berbeda dengan normal *helix angle*. Pahat variabel *helix angle* memiliki persamaan non linear $Ra = 0,450 \cdot ap^{0,301}$. Sedangkan pahat normal *helix angle* memiliki persamaan non linear $Ra = 1,37 \cdot ap^{0,332}$.

Kata kunci: Variabel *helix angle*, *axial depth of cut*, *end milling*, *chatter*, resonansi, *surface roughness*

SUMMARY

Arda Nur Fauzan, Major of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, July 2018, *Influence of Variable Helix Angle and Axial Depth of Cut in End Milling Process to Surface Roughness of Aluminium*, Adviser : Achmad As'ad Sonief and Fikrul Akbar Alamsyah.

The development of manufacturing industry makes improvement on productivity with the founding of CNC machines. Improvement on CNC machines still has problem in chatter, causing damage on machining product. Chatter is machining vibration that is caused by unstable machining process. One of the most destructive form of chatter is resonance. Variable helix angle cutter has variation in pitch angle, so the variable helix angle cutter can produce different tooth passing frequency in every adjacent flutes and can be used to prevent and control resonance. Axial depth of cut as one of important parameter in machining has effect in chatter. The purpose of this minithesis is to do research in influence of variable helix angle cutter and axial depth of cut on surface roughness as one of the quality parameter of machining product. Machining operation used in this research was end milling. Variable helix angle cutter was $40^\circ / 42^\circ$. Three levels of axial depth of cut were 0,6 mm, 1,2 mm, and 1,8 mm with spindle speed of 600 rev/min. The result of the research showed that variable helix angle cutter produced lower values of surface roughness (Ra) in every level of axial depth of cut, that were 0,390 μm ; 0,469 μm ; 0,543 μm compared to normal helix angle, that were 1,150 μm ; 1,558 μm ; 1,633 μm . The correlation of increasing axial depth of cut to surface roughness (Ra) on variable helix angle cutter had different regression equation compared to normal helix angle. Variable helix angle cutter had non linear equation of $Ra = 0,450 \cdot ap^{0,301}$. Normal helix angle cutter had non linear equation of $Ra = 1,37 \cdot ap^{0,332}$.

Keywords: Variable helix angle, axial depth of cut, end milling, chatter, resonance, surface roughness

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur dalam satu abad terakhir memegang peranan penting untuk menunjang kehidupan manusia. Salah satu bidang terpenting manufaktur adalah permesinan. Mulai dari peralatan rumah tangga hingga komponen pesawat udara diproduksi melalui proses permesinan. Ditemukannya mesin *Computer Numerically Controlled* (CNC) semakin menjadikan proses permesinan sebagai salah satu unsur penting manufaktur. Dengan mesin CNC proses permesinan dapat dilakukan dengan cepat dan tepat, menghasilkan produk berkualitas tanpa mengurangi produktivitas.

Teknologi yang berkembang pesat meningkatkan proses permesinan mesin CNC. *Milling* sebagai salah satu proses penting dalam permesinan telah mengalami kemajuan yang signifikan. Berbagai macam mesin mulai dari tiga *Axis* sampai dengan enam *Axis*, *spindle* yang mampu berputar melebihi dua puluh ribu *revolutions per minute*, dan pahat dengan geometri yang bervariasi semakin meningkatkan produktivitas manufaktur. Namun terdapat masalah yang belum dapat diselesaikan secara tuntas dalam proses *milling*, yaitu *regenerative chatter* dan resonansi.

Chatter merupakan masalah yang paling sulit diselesaikan dari semua masalah yang dihadapi dalam permesinan. Munculnya *chatter* sangat merusak dan merugikan, karena mencegah untuk mendapatkan kualitas produk yang diinginkan dan memperpendek umur mesin, *spindle*, dan pahat. *Regenerative Chatter* terjadi karena *intermittent cut* pada proses *milling* yang menyebabkan permesinan tidak stabil dan menghasilkan beda fase pada *chipload*. *Regenerative chatter* tersebut terus berulang dengan *time delay* yang sama. *Regenerative chatter* dapat menjadi maksimum dan menyebabkan amplitudo getaran yang tinggi (J. Munoa *et al.*, 2016).

Resonansi terjadi ketika frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Ketika resonansi amplitudo *displacement* pahat meningkat secara signifikan. Meningkatnya amplitudo *displacement* pahat menyebabkan permukaan yang buruk pada produk permesinan (Song *et al.* 2014).

Geometri pahat yang inovatif semakin dikembangkan untuk mengendalikan *regenerative chatter* maksimum dan resonansi. *Helix angle* sebagai salah satu unsur geometri pahat memegang peranan penting pada peredaman *regenerative chatter* maksimum

dan resonansi. Variabel *helix angle* pada pahat *milling* membuat variasi dari *time delay* pada mata pahat yang bersebelahan. Variasi *time delay* tersebut akan mengurangi *regenerative effect* pada batas parameter permesinan tertentu sehingga dapat mengurangi *regenerative chatter*. Variasi *time delay* juga menghindarkan *tooth passing frequency* dari frekuensi natural sistem permesinan sehingga mencegah resonansi. (J. Munoa *et al.*, 2016).

Chatter dapat dikontrol dengan pemilihan parameter permesinan yang tepat. Salah satu parameter penting adalah *axial depth of cut*. *Axial depth of cut* adalah parameter yang menentukan seberapa dalam pahat melakukan proses permesinan. Semakin tinggi nilai *axial depth of cut*, maka *chatter* yang terjadi pada proses permesinan akan semakin buruk. Hal tersebut membatasi *Material Removal Rate* (MRR) dari proses permesinan sehingga mengurangi produktivitas (Gautam *et al.*, 2015).

Permukaan benda dengan tidak memandang pada proses pembentukannya memiliki kekasaran permukaan (*surface roughness*). Tidak ada proses manufaktur yang dapat menghasilkan permukaan dengan benar-benar rata (*flat surface*) (Bhusnan, 2013). Kehadiran *regenerative chatter* maksimum dan resonansi akan merusak permukaan material saat proses permesinan, mencegah mendapatkan hasil yang baik pada produk permesinan. *Regenerative chatter* harus dikurangi sebaik mungkin dan resonansi harus dihindari dengan cara yang tetap menunjang produktivitas (J. Munoa *et al.*, 2016).

Berdasarkan pembahasan yang telah dipaparkan, *regenerative chatter* dapat dikurangi dan resonansi dapat dihindari dengan geometri pahat *milling* berupa variabel *helix angle* dan pemilihan parameter permesinan berupa *depth of cut* yang tepat. *Regenerative chatter* yang rendah dan pencegahan resonansi akan menurunkan nilai kekasaran permukaan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* pada proses *end milling* untuk mengendalikan *regenerative chatter* maksimum ataupun resonansi sehingga didapat *surface roughness* yang baik pada Aluminium.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang yang tertulis di atas, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* pada proses *end milling* sebagai *regenerative chatter maximum and resonance control* terhadap *surface roughness* Aluminium.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjadikan penelitian ini terarah dan menghindari meluasnya permasalahan maka dibutuhkan batasan-batasan masalah sebagai berikut.

1. Kondisi *tool* dianggap baik pada semua proses permesinan.
2. Mesin yang digunakan dalam keadaan baik.
3. Peningkatan temperatur yang terjadi saat proses permesinan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengendalikan *regenerative chatter* maksimum dan resonansi pada permesinan *end milling* sehingga didapat *surface roughness* yang baik pada permukaan Aluminium. Pengendalian *regenerative chatter* maksimum dan resonansi menggunakan variabel *helix angle* dan pemilihan *axial depth of cut*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan industri manufaktur dalam mencegah *regenerative chatter* maksimum dan resonansi pada permesinan *end milling* material Aluminium.
2. Memberikan pemahaman untuk peneliti dalam analisis permesinan *end milling* khususnya mengenai *regenerative chatter* dan resonansi sehingga dapat diaplikasikan pada industri manufaktur.
3. Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai *regenerative chatter maximum and resonance control* untuk mengurangi *surface roughness* melalui variabel *helix angle* dan *axial depth of cut*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Munoa (2016) memaparkan beberapa metode sebagai *regenerative chatter maximum and resonance control*. Salah satu metode adalah variabel *helix angle* pada pahat *end mill*. Variabel *helix angle* pada pahat *end mill* akan menghasilkan *pitch angle* yang berbeda pada sumbu aksial pahat. Geometri khusus tersebut menghasilkan variasi dari *time delay* pada mata pahat yang bersebelahan. Variasi *time delay* mencegah *regenerative effect* maksimum dan resonansi sehingga mengurangi *displacement* getaran.

Comak (2016) melakukan penelitian mengenai stabilitas dari variasi *helix angle* dan *pitch angle* pada pahat *end mill*. Penelitian dilakukan melalui simulasi untuk menemukan geometri pahat yang optimal untuk stabilitas. Penelitian tersebut menghasilkan variasi yang optimal untuk *helix angle* dan *pitch angle*. Variabel *helix angle* yang optimal memiliki perbedaan sebanyak 1° - 2° pada setiap mata pahat bersebelahan.

Kashyapi (2015) melakukan penelitian untuk mengendalikan *chatter* dengan pemilihan *axial depth of cut*. Pemilihan *axial depth of cut* yang tepat pada pengaturan *spindle speed* yang digunakan dapat mengurangi *cutting force*. *Cutting force* yang rendah dapat mengurangi *displacement* getaran dan menghasilkan nilai *surface roughness* yang rendah.

2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur merupakan prosedur yang memberikan perubahan baik secara fisik maupun kimiawi pada benda kerja (*work material*) untuk meningkatkan nilai dari material tersebut. Proses manufaktur dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *process operation* dan *assembly operation*. *Process operation* merupakan proses transformasi dari benda kerja untuk ditingkatkan pada tahap yang mendekati produk akhir. *Assembly operation* merupakan proses penggabungan dua atau lebih komponen menjadi sebuah produk baru, berupa *assembly* atau *subassembly*. Keduanya merupakan serangkaian proses yang saling berhubungan untuk menjadikan benda kerja menjadi produk akhir.

2.3 Permesinan

Process operation dari manufaktur terdiri dari banyak jenis, salah satu yang paling penting adalah permesinan (*machining*). Permesinan memiliki prinsip dasar berupa

pemotongan permukaan material yang dijadikan *chip* dengan tujuan membentuk benda kerja menjadi bentuk yang diinginkan menggunakan alat (*cutting tool*) yang tajam.

2.4 Computer Numerical Control (CNC)

Computer Numerical Control (CNC) merupakan bentuk dari otomasi yang dapat diprogram untuk menentukan gerak mekanik dari peralatan permesinan. Program pada CNC menentukan posisi relatif dari *workhead* dan *workpart*. *Workhead* merupakan alat yang digunakan untuk permesinan dan *workpart* merupakan benda kerja yang dilakukan permesinan.



Gambar 2.1 Mesin CNC
Sumber: Groover (2013)

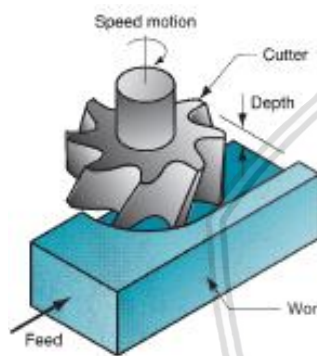
Sistem CNC memiliki tiga komponen penting, yaitu *part program*, *machine control unit*, dan *processing equipment*. *Part program* merupakan sekumpulan perintah yang akan dilaksanakan oleh *processing equipment*. *Part program* dibuat dalam bahasa *G code*, berisi perintah mengenai pengoperasian mesin dan posisi relatif *workhead* terhadap *workpart* saat melakukan permesinan. *Part program* juga berisi perintah berupa parameter permesinan yang diberikan pada mesin, termasuk di dalamnya *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. *Part program* dibuat oleh *programmer* baik secara manual maupun menggunakan simulasi.

Machine Control Unit (MCU) merupakan *microcomputer* yang menyimpan data dan melakukan eksekusi program yang telah dibuat dengan mengkonversikan setiap perintah untuk menjalankan *processing equipment*. MCU terdiri dari komponen *hardware* dan *software*. Komponen *hardware* meliputi *microcomputer* dan *monitor* untuk menampilkan *input* dan *output* mesin kepada *user*. Komponen *software* meliputi sistem kontrol, kalkulasi algoritma, dan *software* penerjemah untuk mengkonversi *part* program menjadi format yang

dapat dimengerti mesin. MCU merupakan komponen yang membedakan mesin CNC dari mesin generasi sebelumnya. *Processing equipment* merupakan alat untuk melaksanakan perintah dari *part program* yang telah diproses MCU untuk melakukan permesinan, mengubah bentuk benda kerja menjadi bentuk yang diinginkan.

2.5 Milling

Milling merupakan permesinan dengan prinsip dasar material dimakan (*feed/fed*) oleh alat silinder dengan banyak mata potong/pahat (*cutting edges/flutes*). Hal yang perlu diingat untuk membedakan dengan proses *drilling*, sumbu rotasi (*axial*) pada pahat *milling* tegak lurus dengan arah pemakanan, dimana pada *drilling*, arah pemakanan pahat adalah parallel dengan sumbu rotasinya.

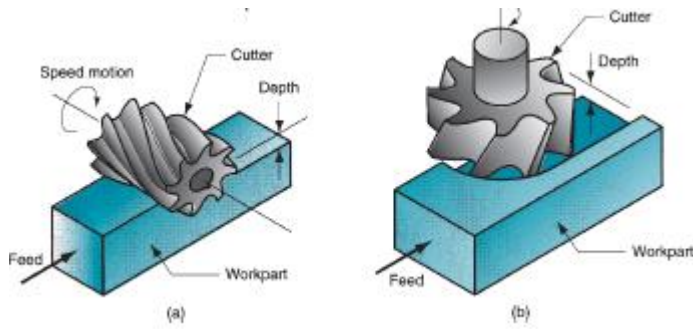


Gambar 2.2 Proses *milling*
Sumber: Groover (2013)

Milling memiliki karakteristik *interrupted / intermittent cutting*, dimana setiap mata pahat akan masuk dan keluar benda kerja pada saat pemakanan. *Interrupted / intermittent cutting* menyebabkan mata pahat berada pada siklus *cutting force* yang fluktuatif. Material dan geometri dari pahat harus memiliki karakteristik yang baik untuk proses *interrupted cutting* tersebut.

2.5.1 Jenis Operasi *Milling*

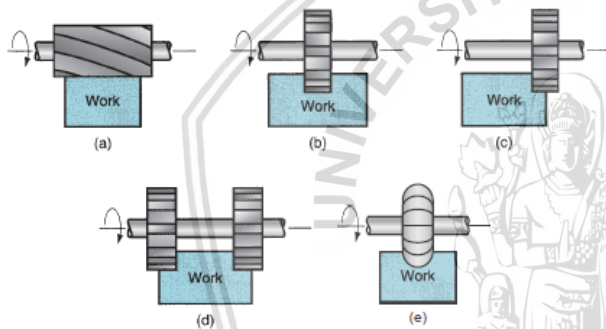
Secara garis besar *milling* dibagi menjadi dua jenis operasi, yaitu *peripheral milling* dan *face milling*. Kedua jenis operasi *milling* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Dua jenis operasi *milling*, gambar (a) *Peripheral milling*, dan gambar (b) *Face milling*
Sumber: Groover (2013)

1. *Peripheral Milling*

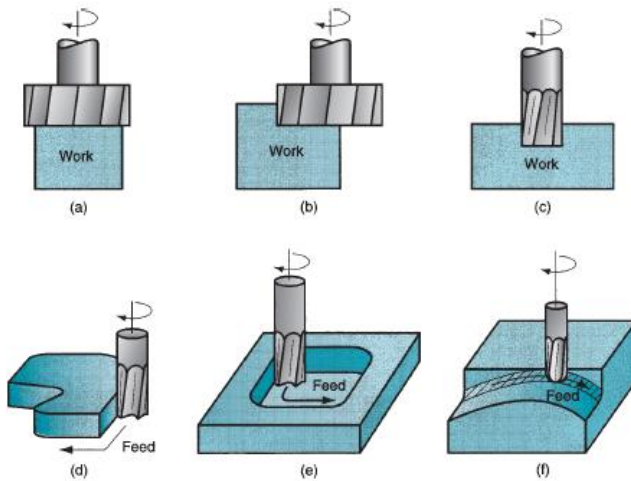
Pada *peripheral milling* (*plain milling*), sumbu axial dari pahat *parallel* dengan permukaan material benda kerja yang dilakukan permesinan dan mata pahat berada pada keliling luar dari pahat. Contoh dari *peripheral milling* adalah *slab milling*, *slot milling*, *side milling*, *straddle milling*, dan *form milling*.



Gambar 2.4 Contoh *peripheral milling*, (a) *Slab milling*, (b) *Slotting/slot milling* (c) *Side milling*, (d) *Straddle milling*, dan (e) *Form milling*
Sumber: Groover (2013)

2. *Face Milling*

Jenis operasi kedua adalah *face milling*. Perbedaan mendasar dengan *peripheral milling* adalah sumbu *axial* pahat tegak lurus dengan permukaan benda kerja yang dimakan, dan permesinan dapat dilakukan oleh mata pahat pada keliling pahat dan ujung bawah dari pahat. Operasi dari *face milling* memungkinkan pahat membentuk benda kerja dengan lebih variatif. Contoh dari penerapan jenis operasi *face milling* adalah *conventional face milling*, *partial face milling*, *end milling*, *profile milling*, *pocket milling*, dan *surface contouring*.



Gambar 2.5 Contoh dari operasi face milling: (a) *Conventional face milling*, (b) *Partial face milling*, (c) *End milling*, (d) *Profile milling*, (e) *Pocket milling*, dan (f) *Surface contouring*
Sumber: Groover (2013)

2.5.2 Parameter Permesinan Milling

Permesinan pada mesin *milling* menggunakan parameter penting untuk menentukan proses pemakanan pahat pada benda kerja. Pemilihan parameter permesinan yang tepat dapat menghasilkan permukaan benda kerja yang baik, produktivitas yang tinggi, dan umur pahat yang lebih lama. Sebaliknya, kesalahan pada pemilihan parameter permesinan tidak hanya menghasilkan permukaan yang buruk pada benda kerja, namun juga dapat merusak pahat dan komponen mesin seperti *spindle*. Parameter penting pada permesinan *milling* adalah:

1. *Cutting Speed* dan *Spindle Speed*

Cutting speed merupakan kecepatan pahat dalam pemotongan benda kerja untuk dijadikan *chip* yang ditentukan oleh diameter pahat dan *spindle speed*. *Spindle speed* merupakan kecepatan *spindle* berputar untuk memberi gerak rotasi pada pahat. *Cutting speed* dan *spindle speed* berbanding lurus sesuai persamaan berikut.

$$v_C = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (2-1)$$

Sumber: Sandvik (2018)

Dimana:

D = Diameter pahat *milling* (mm)

n = *Spindle speed* (rev/min)

v_c = *Cutting speed* (m/min)

2. *Feed Per Tooth*, *Flutes* dan *Feed Rate*

Feed per tooth merupakan besaran yang menyatakan tebal *chip* yang dimakan oleh setiap mata pahat. *Flutes* merupakan jumlah mata pahat yang ada pada satu pahat. Jika *feed per tooth* dikalikan dengan jumlah mata pahat (*flutes*) dan *spindle speed* maka

didapat *feed rate*. *Feed rate* merupakan jarak pemakanan secara linear relatif dengan benda kerja. Hubungan *feed per tooth*, *flutes*, dan *feed rate* diberikan pada persamaan berikut.

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z \quad (2-2)$$

Sumber: Sandvik (2018)

Dimana:

v_f = *Feed rate* (mm/min)

f_z = *feed per tooth* (mm)

n = *Spindle speed* (rev/min)

z = Jumlah *flutes* / mata pahat

3. *Axial Depth of Cut* dan *Radial Depth of Cut*

Axial depth of cut (a_p) merupakan besaran yang menyatakan seberapa dalam pemakanan yang dilakukan pahat pada sumbu *axial*. *Radial depth of cut* (a_e) merupakan besaran yang menyatakan seberapa dalam pemakanan yang dilakukan pahat pada sumbu *radial*. Pemberian *axial* maupun *radial depth of cut* yang tepat pada pahat merupakan hal penting, karena mempengaruhi besarnya *cutting force* dan *material removal rate*.

4. *Material Removal Rate*

Material removal rate merupakan besaran yang menyatakan volume benda kerja yang dimakan oleh pahat setiap satu satuan waktu. *Material removal rate* menentukan produktivitas pada *milling*. Semakin besar *material removal rate* maka akan dihasilkan produktivitas yang semakin tinggi. *Material removal rate* didapat dari perkalian antara *feed rate*, *axial depth of cut*, dan *radial depth of cut*. Getaran permesinan membatasi *feed rate*, *axial depth of cut*, dan *radial depth of cut* sehingga membatasi *material removal rate* saat permesinan.

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \quad (2-3)$$

Sumber: Sandvik (2018)

Dimana:

Q = *Material removal rate* (cm³/min)

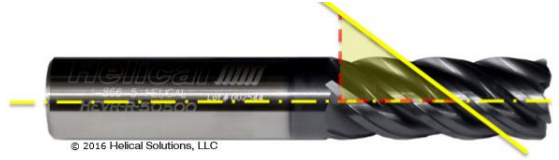
a_p = *Axial depth of cut* (mm)

a_e = *Radial depth of cut* (mm)

v_f = *Feed rate* (mm/min)

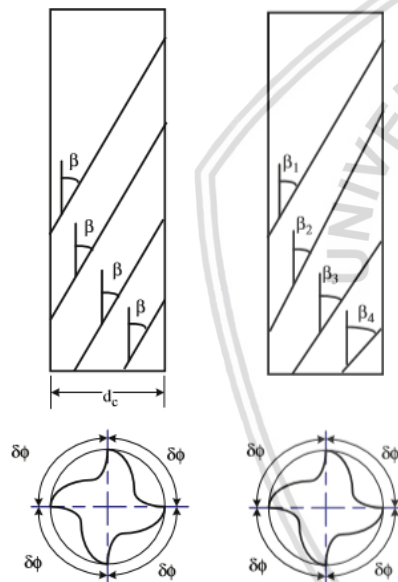
2.6 Variabel *Helix Angle*

Helix angle merupakan bagian penting pada struktur geometri pahat yang menyatakan sudut antara *center line* dari pahat dengan sisi tajam mata pahat. *Helix angle* berfungsi sebagai *chip clearance*.



Gambar 2.6 *Helix angle* pada *end mill*
Sumber: Helical Solutions (2016)

Pahat dengan variabel *helix angle* memiliki *helix angle* yang berbeda pada setiap mata pahat yang bersebelahan. *Helix angle* yang berbeda tersebut menyebabkan *pitch angle* yang berbeda pada setiap jarak antar dua pahat bersebelahan.



Gambar 2.7 Normal *helix angle* (kiri) dan variabel *helix angle* (kanan)
Sumber: Yusoff (2010)

$$\Delta\phi_{(a_p)} = \Delta\phi_{(0)} + \frac{a_p (\tan(\beta_k) - \tan(\beta_{k-1}))}{R} \quad (2-10)$$

Sumber: Niu (2017)

Dimana:

$\Delta\phi_{(a_p)}$ = *Pitch angle* pada *axial depth of cut* a_p (rad)

$\Delta\phi_{(0)}$ = *Pitch angle* pada ujung pahat (rad)

a_p = *Axial depth of cut* (mm)

β_k = *Helix angle* pada mata pahat k (rad)

β_{k-1} = *Helix angle* pada mata pahat $k - 1$ (rad)

R = Radius pahat (mm)

Pitch angle yang berbeda pada pahat *milling* menyebabkan variasi *time delay / tooth passing period*. Variasi *time delay* menyebabkan variasi pada *tooth passing frequency*.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_s} \quad (2-11)$$

Sumber: Wang (2015)

$$\tau = T \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (2-12)$$

Sumber: Wang (2015)

$$\omega_t = \frac{2\pi}{\tau} \quad (2-13)$$

Sumber: Wang (2015)

Dimana:

T = Periode pahat *milling*

ω_s = *Spindle speed* (rad/s)

τ = *Time delay / tooth passing period* (sekon)

$\Delta\phi$ = *Pitch angle* di antara dua mata pahat bersebalahan (rad)

ω_t = *Tooth passing frequency* (rad/s)

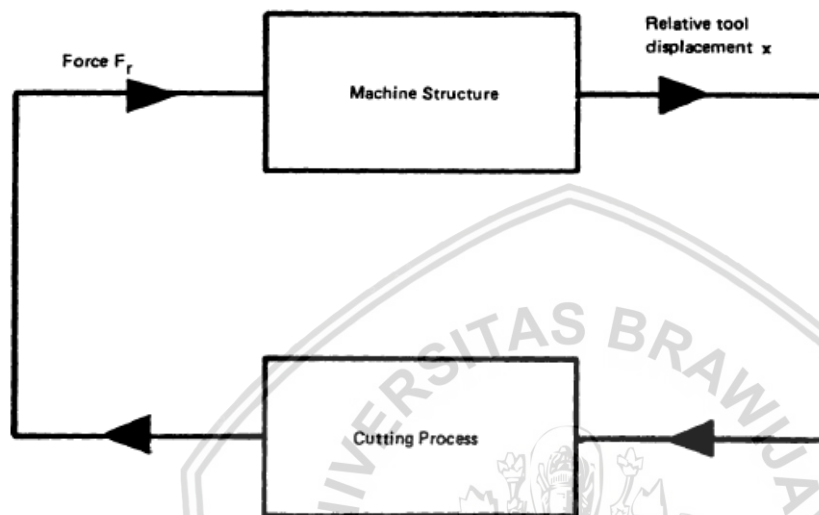
2.7 Getaran

Getaran merupakan osilasi dari suatu sistem struktur dengan acuan titik kesetimbangan (*equilibrium position*). Getaran terjadi ketika sistem struktur mengalami perpindahan (*displacement*) dari titik keseimbangan karena gaya yang mengeksitasi sistem tersebut. Getaran yang terjadi pada struktur mekanis dari suatu sistem dapat menyebabkan kerugian.

Getaran pada permesinan *milling* dapat terjadi dikarenakan proses permesinan berupa *interrupted / intermittent cut*. Sifat *interrupted/intermittent cut* pada permesinan *milling* menyebabkan fluktuasi pada *cutting force*, dimana fluktuasi *cutting force* tersebut menyebabkan *displacement* pahat *milling*. Getaran yang diakibatkan oleh fluktuasi *cutting force* pada sistem permesinan disebut *self excited vibration* atau *chatter*. Pada *chatter* dapat terjadi *regenerative chatter* dimana *cutting force* pada proses permesinan semakin tidak stabil akibat adanya perbedaan fase pada *chipload*. *Regenerative chatter* dapat bernilai maksimum yang menyebabkan fluktuasi *cutting force* yang tinggi sehingga menyebabkan *displacement* yang tinggi. Selain *regenerative chatter* maksimum getaran lain yang bersifat merusak yang dapat terjadi adalah resonansi. Resonansi terjadi ketika rasio perbandingan frekuensi natural dan *tooth passing frequency* bernilai *integer*. Kedua jenis getaran, *regenerative chatter* maksimum dan resonansi, dapat menyebabkan meningkatnya *displacement* getaran, menghasilkan *surface finish* yang buruk.

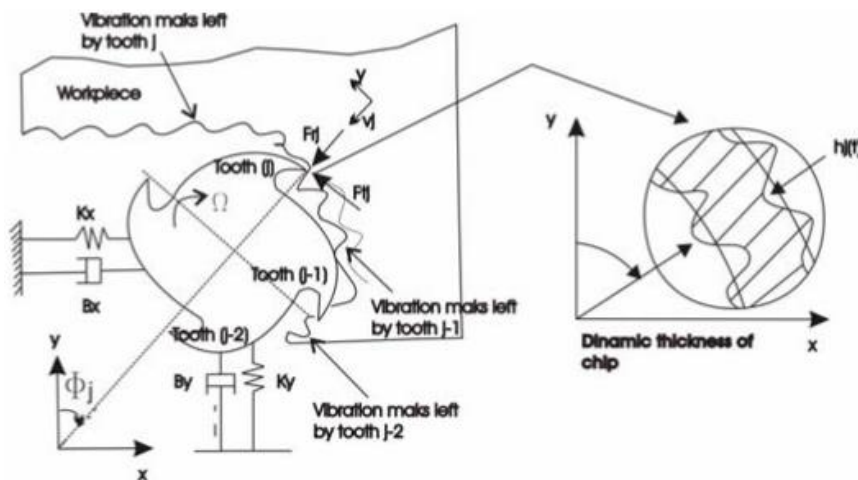
2.7.1 Regenerative Chatter

Chatter merupakan getaran yang tereksitasi dengan sendirinya (*self excited vibration*) dimana getaran terjadi karena proses pembentukan *chip* pada permesinan yang tidak stabil. *Chatter* terjadi dalam sebuah siklus berupa *chatter loop*. *Chatter loop* terbagi menjadi dua elemen penting, yaitu proses pemotongan (*cutting process*) dan struktur sistem permesinan (*machine structure*).



Gambar 2.8 Chatter loop
Sumber: Boothroyd

Permesinan *milling* melibatkan lebih dari satu mata pahat, dan permesinan pada setiap mata pahat terputus-putus (*intermittent*). Terputus-putusnya permesinan pada mata pahat menyebabkan fluktuasi pada *cutting force*. Fluktuasi pada *cutting force* menyebabkan *displacement machine structure* berupa pahat *milling*. *Displacement* tersebut menyebabkan penyimpangan dari *feed per tooth* pada *cutting process*, sehingga memiliki *instantaneous chip thickness* yang dinamis (bergelombang). *Instantaneous chip thickness* yang dinamis dinamakan *chipload*. *Chipload* akan kembali menyebabkan fluktuasi pada *cutting force*.



Gambar 2.9 Chatter dengan *instantaneous chip thickness* yang bervariasi

Sumber: Lacerda (2004)

$$F_{t(t)} = g_{(\phi)} \cdot K_t \cdot h_{(t)} \cdot a_p \quad (2-4)$$

$$F_{r(t)} = K_r \cdot F_{t(t)} \quad (2-5)$$

$$g_{(\phi)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi_{st} < \phi_{(t)} < \phi_{ex} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Sumber: Lacerda (2004)

Dimana:

$F_{t(t)}$ = Tangential cutting force pada waktu t (Newton)

$F_{r(t)}$ = Radial cutting force pada waktu t (Newton)

K_t = Tangential cutting force coefficient (N/mm²)

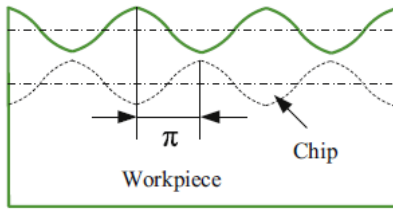
K_r = Radial cutting force coefficient

$h_{(t)}$ = Chipload (mm)

a_p = Axial depth of cut (mm)

$g_{(\phi)}$ = Window function

Regenerative effect pada *chatter* dipengaruhi oleh perbedaan fase *chipload* pada waktu t dan $t - \tau$. *Regenerative chatter* maksimum terjadi ketika beda fase *chipload completely out of phase*. Beda fase *chipload completely out of phase* terjadi saat perbandingan frekuensi natural dan *tooth passing frequency* bernilai bilangan *integer* ditambah 0,5. *Tooth passing frequency* dipengaruhi oleh *spindle speed* dan *pitch angle* pahat *milling*. Saat *regenerative chatter* maksimum, amplitudo *cutting force* akan memiliki nilai yang tinggi, menyebabkan *displacement* getaran yang tinggi.



Gambar 2.10 Chipload yang memiliki beda fase *completely out of phase*

Sumber: Song (2014)

$$\frac{\omega_n}{\omega_t} = \frac{\theta}{2\pi} \quad (2-6)$$

Sumber: Pejryd (2012)

Dimana:

ω_n = Frekuensi natural (rad/s)

ω_t = *Tooth passing frequency* (rad/s)

θ = Beda fase *chipload* (rad)

$$\omega_t = \frac{\omega_s \cdot 2\pi}{\Delta\phi} \quad (2-7)$$

Sumber: Wang (2015)

Dimana:

ω_t = *Tooth passing frequency* (rad/s)

ω_s = *Spindle speed* (rad/s)

$\Delta\phi$ = *Pitch angle* (rad)

2.7.2 Resonansi

Selain *regenerative chatter* maksimum, *surface roughness* material benda kerja permesinan *milling* akan meningkat dan menghasilkan *surface finish* yang buruk disebabkan oleh resonansi. Resonansi terjadi ketika frekuensi natural sistem permesinan dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*, dimana *tooth passing frequency* dipengaruhi oleh *spindle speed* dan *pitch angle*. Resonansi menyebabkan amplitudo *displacement* getaran memiliki nilai yang sangat tinggi, sehingga merusak permukaan benda kerja dan menyebabkan nilai *surface roughness* yang tinggi.

$$\frac{\omega_n}{\omega_t} = \frac{\theta}{2\pi} \quad (2-8)$$

Sumber: Pejryd (2012)

Dimana:

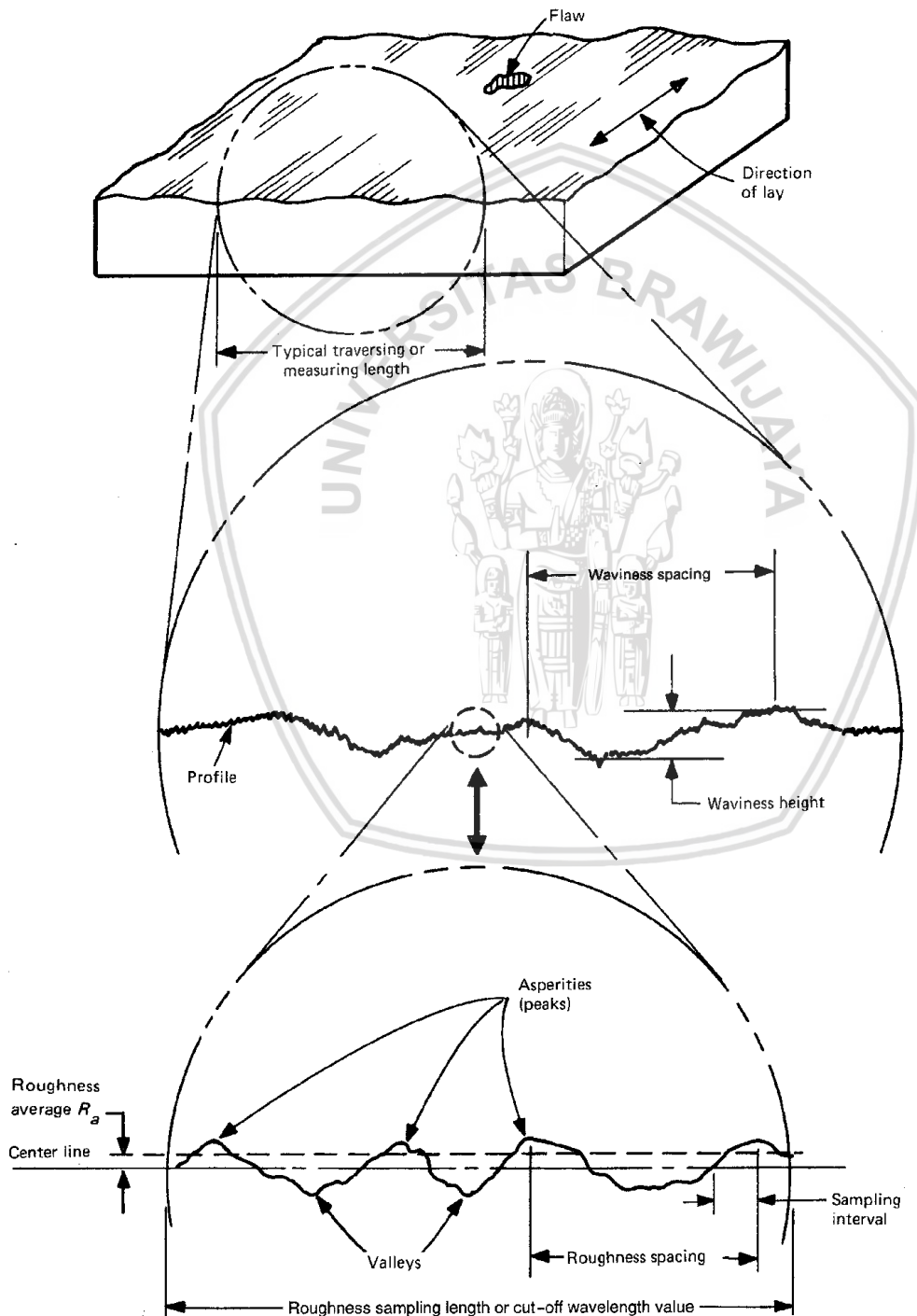
ω_n = Frekuensi natural (rad/s)

ω_t = *Tooth passing frequency* (rad/s)

θ = Beda fase *chipload* (rad)

2.8 Surface Roughness

Surface roughness (kekasaran permukaan) merupakan bagian dari *surface texture* dengan batas panjang gelombang (*wave length*) tertentu. Batas panjang gelombang (*wave length*) yang membedakan *surface roughness* dengan *surface waviness* dinamakan *cut off*. Apabila panjang gelombang pada suatu *sample* melebihi *cut off* maka termasuk kategori *surface waviness*, namun apabila panjang gelombang pada suatu *sample* kurang dari *cut off* maka termasuk dalam *surface roughness*.



Gambar 2.11 Surface texture yang terbagi menjadi *surface waviness* dan *surface roughness*
Sumber: Bharat Busnan (2013)

Surface roughness memiliki beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan. Masing-masing parameter memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Beberapa parameter penting yang pada umumnya digunakan pada permesinan manufaktur sebagai berikut.

1. *Ra, arithmetical mean roughness value*

Ra merupakan rata-rata aritmatika dari *surface roughness*. Perhitungan Ra menggunakan penyimpangan dari garis rata-rata (*mean line*) profil permukaan. Ra diukur sepanjang *evaluation length*, dimana panjang satu *evaluation length* merupakan lima kali panjang *sample*, dan satu panjang *sample* sama dengan *cut off*.

2. *Rv, maximum valley depth*

Rv merupakan lembah terendah dihitung dari garis rata-rata profil. Pengukuran Rv hanya satu kali sepanjang *evaluation length*, dimana panjang *evaluation length* sama dengan lima kali panjang *cut off*.

3. *Rp, maximum peak height*

Rp merupakan puncak tertinggi dihitung dari garis rata-rata profil. Pengukuran Rp hanya satu kali sepanjang *evaluation length*, dimana panjang *evaluation length* sama dengan lima kali panjang *cut off*.

4. *Rt, maximum height in one evaluation length*

Rt merupakan penjumlahan jarak dari puncak tertinggi ke lembah terendah dihitung dari garis rata-rata profil. Sama seperti Rv dan Rp, pengukuran Rt hanya satu kali sepanjang *evaluation length*.

5. *Rzi, maximum height in one sample length*

Rzi merupakan penjumlahan dari puncak tertinggi dan lembah terendah yang diukur dari garis rata-rata profil. Perbedaan mendasar Rzi dan Rt adalah Rzi diukur pada satu *sample length*, sementara Rt diukur pada panjang satu *evaluation length*.

6. *Rz, mean roughness depth*

Rz merupakan nilai rata-rata lima nilai Rzi dari lima *sample length*.

Surface roughness terbentuk dari fluktuasi profil permukaan, terdiri dari puncak (*peak*) dan lembah (*valley*) dengan berbagai amplitudo dan panjang gelombang (*wave length*). Fluktuasi profil pada permesinan disebabkan oleh getaran pahat pada proses pemakanan benda kerja.

2.9 Kerangka Pemikiran

2.9.1 Pengaruh Variabel *Helix Angle* terhadap *Surface Roughness*

Pahat dengan variabel *helix angle* memiliki *helix angle* yang berbeda pada mata pahat bersebelahan. Variabel *helix angle* menyebabkan *pitch angle* yang berbeda pada dua mata pahat bersebelahan (subbab 2.7).

Regenerative chatter maksimum pada permesinan *milling* terjadi ketika beda fase *chipload completely out of phase*. Pahat dengan variabel *helix angle* memiliki nilai *pitch angle* yang bervariasi. Variasi *pitch angle* menyebabkan variasi *tooth passing frequency*, sehingga pahat dengan variabel *helix angle* dapat terhindar dari *regenerative chatter* maksimum.

Resonansi disebabkan rasio frekuensi natural dan *tooth passing frequency* bernilai *integer* (subbab 2.6.2). Amplitudo *displacement* getaran meningkat secara signifikan saat resonansi. Pahat dengan variabel *helix angle* memiliki variasi *pitch angle*. Variasi *pitch angle* menyebabkan variasi *time delay* pada pahat *milling* sehingga *tooth passing frequency* memiliki nilai yang bervariasi. Variasi *tooth passing frequency* dapat mencegah resonansi sehingga amplitudo *displacement* getaran tidak meningkat secara signifikan.

Regenerative chatter maksimum dan resonansi menyebabkan meningkatnya amplitudo *displacement* getaran. Pahat dengan variabel *helix angle* mencegah *regenerative chatter* maksimum dan *resonansi*, sehingga didapat amplitudo *displacement* getaran yang lebih rendah dibanding pahat dengan normal *helix angle*. Amplitudo *displacement* getaran dengan variabel *helix angle* yang lebih rendah dari pahat dengan normal *helix angle* menyebabkan pahat dengan variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat dengan normal *helix angle*.

2.9.2 Pengaruh *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness*

Axial depth of cut merupakan besaran yang menyatakan seberapa dalam pahat *milling* melakukan pemakanan. *Axial depth of cut* mempengaruhi *regenerative chatter* dan resonansi. Nilai *axial depth of cut* yang semakin tinggi akan meningkatkan nilai *cutting force* (subbab 2.6.1). Selain nilai *cutting force* yang tinggi, pada permesinan *milling*, *cutting force* memiliki sifat fluktuatif. Sifat fluktuatif dan nilai *cutting force* yang tinggi menyebabkan keadaan tidak stabil pada *machine structure* berupa pahat *milling*, sehingga amplitudo *displacement* getaran semakin tinggi. Amplitudo *displacement* yang semakin tinggi menyebabkan *cutting process* tidak stabil sehingga dihasilkan *chipload* yang semakin tinggi.

Nilai *chipload* yang semakin tinggi akan meningkatkan *cutting force*. *Chatter loop* tersebut terus berulang seperti yang dibahas pada subbab 2.6.1.

Resonansi terjadi saat rasio frekuensi natural dan *tooth passing frequency* bernilai *integer* (subbab 2.6.2). *Axial depth of cut* dapat meningkatkan *cutting force*, sehingga jika resonansi terjadi dapat meningkatkan *displacement* getaran secara signifikan.

Regenerative chatter dan resonansi pada nilai *axial depth of cut* yang semakin tinggi menyebabkan amplitudo *displacement* getaran yang semakin tinggi. Amplitudo *displacement* yang tinggi tersebut menyebabkan bekas pada permukaan benda kerja permesinan *milling* sehingga meningkatkan nilai *surface roughness* (Ra).

2.10 Hipotesis

Dengan dasaran pada pembahasan tinjauan pustaka, didapat hipotesis penelitian, yaitu penggunaan pahat dengan variabel *helix angle* dapat mencegah *regenerative chatter* maksimum atau resonansi sehingga didapat *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle*. Nilai *axial depth of cut* yang semakin tinggi akan meningkatkan *cutting force* sehingga dapat meningkatkan *surface roughness* (Ra). Peningkatan *surface roughness* (Ra) akibat *axial depth of cut* memiliki persamaan regresi berbeda pada pahat variabel *helix angle* dan normal *helix angle*.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan tujuan mencari pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* pada proses *end milling* sebagai *maximum regenerative chatter* ataupun *resonance control* untuk menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang rendah pada Aluminium. Penelitian dilakukan dengan membuat *slot* pada setiap level variabel bebas *axial depth of cut*. Pada setiap *slot* terdapat lima garis sampel. Data amplitudo *displacement* dan spektrum frekuensi diambil pada waktu pahat melewati setiap garis sampel. Data *surface roughness* (Ra) diambil pada setiap garis sampel yang telah ditentukan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada Bulan April - Mei Tahun 2018 di Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Pengukuran *surface roughness* dilakukan Bulan Mei Tahun 2018 di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan untuk penelitian ini adalah:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dimanipulasi atau dipilih oleh peneliti sehingga mempengaruhi variabel terikat dengan tujuan untuk menentukan fenomena yang diteliti.

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini berupa:

- a. *Helix Angle* : Variabel *helix angle* 40°/42° ; Normal *helix angle* 40°
- b. *Axial Depth of cut* : 0,6 mm ; 1,2 mm; 1,8 mm

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah faktor-faktor yang diobservasi dan diukur untuk menentukan adanya pengaruh variabel bebas yang ditentukan peneliti. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini berupa *surface roughness* (Ra).

3. Variabel Terkontrol

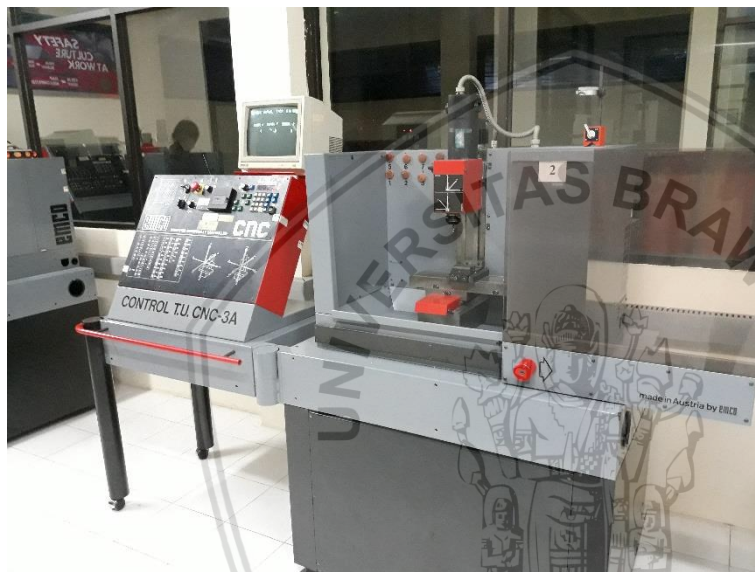
Variabel yang dinetralisasi dan nilainya tetap dibuat konstan oleh peneliti.

Variabel terkontrol yang digunakan pada penelitian ini berupa:

- a. *Diameter end mill* : 6 mm
- b. *Spindle speed* : 600 rev/menit
- c. *Number of flutes* : 4
- d. *Feed* : 50 mm/menit
- e. *Overhang length* : 25 mm

3.4 Alat Penelitian

1. Mesin *Milling Training Unit CNC-3A*



Gambar 3.1 Mesin *milling* TU CNC-3A

Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

- a. Merek : EMCO (Austria)
- b. Jenis : *Milling*
- c. Model : *Training Unit CNC-3A*
- d. Jumlah pahat : 5 buah
- e. Gerak Pahat :

Jarak sumbu x	: 0 – 199.99	mm
Jarak sumbu y	: 0 – 99.99	mm
Jarak sumbu z	: 0 – 199.99	mm
<i>Feed</i>	: 2 – 499	mm/min
	2- 199	inc/min
<i>Feed overite</i>	: 0 – 120%	
<i>Spindel speed</i>	: 0 - 2000	rpm
- f. Ketelitian : 0.01 mm

2. Surface Roughness Tester



Gambar 3.2 Surface roughness tester SJ-301

Sumber: Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

Berfungsi untuk mengukur *surface roughness* permukaan benda yang akan diteliti.

Spesifikasinya adalah:

- a. Merek : Mitutoyo
- b. *Measuring range* : X axis (12.5 mm) dan Z axis (350 μm)
- c. *Stylus tip material* : Diamond
- d. Dimensi : 325 mm x 185 mm x 95 mm

3. Pahat End Mill Helix Angle 40°



Gambar 3.3 Pahat dengan normal *helix angle* 40°

Spesifikasi:

- | | |
|-------------------------|--------------|
| <i>Manufacturer</i> | : HPMT |
| <i>Helix angle</i> | : 40° |
| <i>Number of flutes</i> | : 4 |
| <i>Cutting diameter</i> | : 6 mm |
| <i>Material</i> | : Carbide |

4. Pahat *End Mill Helix Angle* 40°/42°Gambar 3.4 Pahat dengan variabel *helix angle* 40°/42°

Spesifikasi:

<i>Manufacturer</i>	: PT. Agave Primatama distributor of Guhring
<i>Helix angle</i>	: 40°/42°
<i>Number of flutes</i>	: 4
<i>Cutting diameter</i>	: 6 mm
<i>Material</i>	: Carbide

5. *Vibration Meter*Gambar 3.5 *Vibration Meter*

Sumber: Labolatorium Otomasi Manufaktur Universitas Brawijaya (2018)

Spesifikasi:

- a. *Vibration pick up* : Piezoelectric ceramic accelerometer
- b. *Measurement range of acceleration* : 0,1 ~ 199,9 m/s² peak
- c. *Measurement range of velocity* : 0,1 ~ 199,9 m/s rms
- d. *Measurement accuracy* : ±5% ±2 digits
- e. *Measurement frequency range of acceleraton*: 10Hz ~ 1KHz (LO) 1KHz ~ 15KHz (HI)
- f. *Measurement frequency range of velocity* : 10Hz ~ 1KHz (LO)
- g. *Measurement frequency range of displacement* : 10Hz ~ 1KHz (LO)
- h. *Dimensi* : 67 x 30 x 183 mm
- i. *Weight* : 182 g

6. Height Gauge



Gambar 3.6 Height gauge

Sumber: Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

7. Laptop



Gambar 3.7 Laptop dengan software LabView 2013

8. Stopwatch

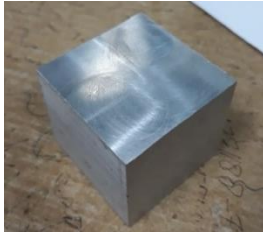


Gambar 3.8 Stopwatch pada handphone

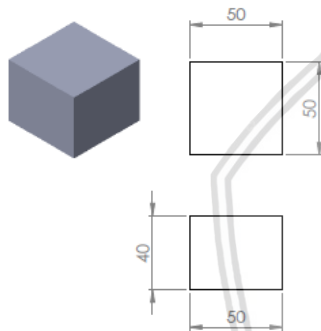
3.5 Dimensi Benda Kerja

Material benda kerja yang digunakan pada penelitian adalah Aluminium Alloy 2017. *Physical properties* dari Aluminium Alloy 2017 sebagai berikut.

- a. *Tensile strength* : 179 MPa
- b. *Yield strength* : 69 MPa
- c. *Elastic modulus* : 72 GPa
- d. *Shear strength* : 124 MPa

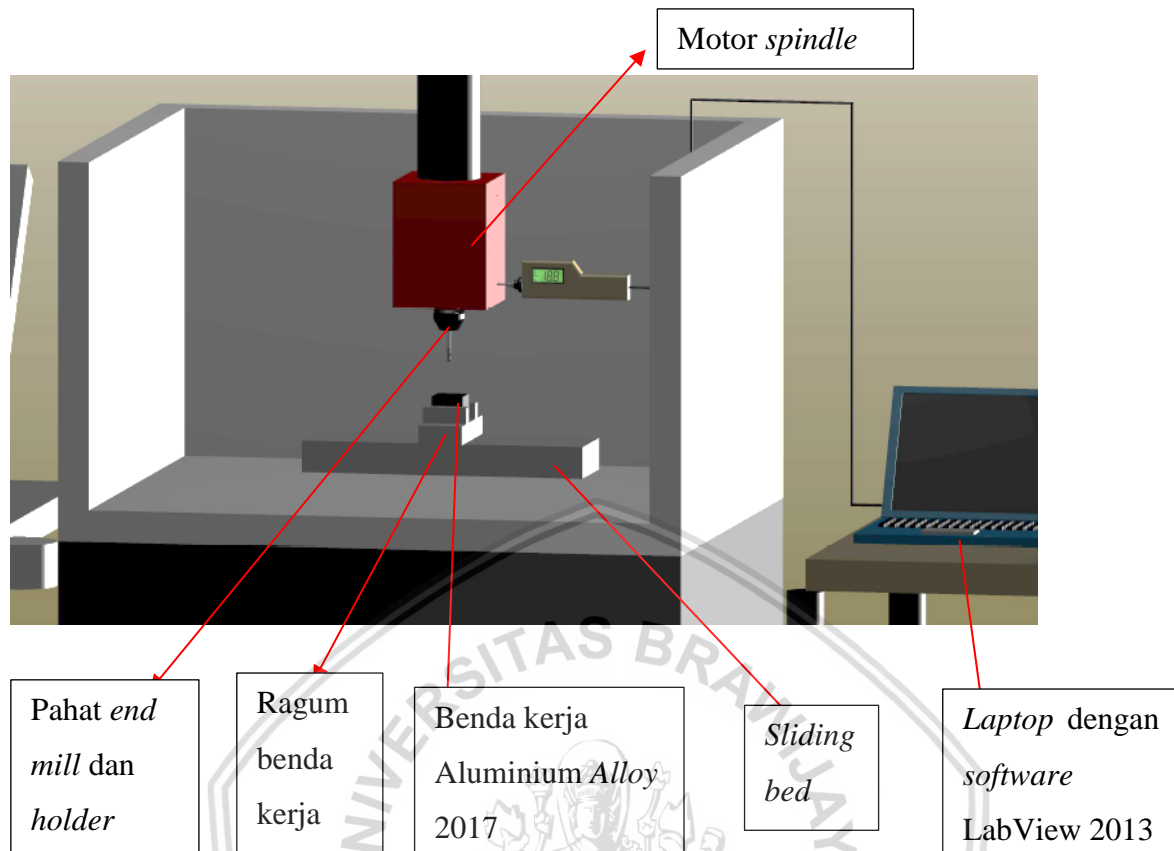


Gambar 3.9 Benda kerja Aluminium Alloy 2017



Gambar 3.10 Dimensi benda kerja Aluminium Alloy 2017 (mm)

3.6 Skema Penelitian



Gambar 3.11 Skema penelitian

3.7 Prosedur Penelitian

Permesinan End Milling Menggunakan Pahat End Mill dengan Helix Angle 40°

1. Siapkan alat dan bahan penelitian, berupa *end mill* dengan *helix angle* 40°, *vibration meter*, Aluminium Alloy 2017.
2. Hubungkan *vibration meter* ke software LabView 2013, kemudian pasang *vibration meter* pada *spindle* mesin *milling* CNC TU-3A.
3. Beri tanda pada benda kerja Aluminium Alloy 2017 yang menandakan lima sampel permesinan menggunakan spidol. Jarak sampel pertama adalah 10 mm dari ujung benda kerja dimana permesinan dimulai, kemudian jarak setiap sampel selanjutnya adalah 8 mm.
4. Pasang benda kerja Aluminium Alloy 2017 pada ragum.
5. Masukkan pahat *end mill* dengan *helix angle* 40° ke dalam *holder*.
6. Pasang *holder* pada mesin *milling* CNC TU-3A.
7. Lakukan pengaturan titik nol benda kerja.
8. Lakukan pengaturan parameter permesinan sesuai dengan variabel bebas dan variabel terkontrol permesinan.

9. Lakukan permesinan *end milling* benda kerja. *Export* data sampel spektrum frekuensi dari *software* LabView 2013 setiap pahat melewati garis sampel. Catat waktu pahat melewati setiap sampel dan waktu total pahat membuat satu *slot* dengan *stopwatch*. Setelah pahat selesai membuat satu *slot*, *export* data amplitudo *displacement* dari *software* LabView 2013.
10. Lakukan langkah no.9 pada setiap level *axial depth of cut*.
11. Setelah permesinan selesai, lepaskan produk permesinan Aluminium Alloy 2017 dari ragum, kemudian beri identitas produk permesinan tersebut.
12. Lakukan pengukuran *surface roughness* (Ra) pada semua sampel produk permesinan Aluminium Alloy 2017.
13. Simpan data *surface roughness* (Ra).
14. Mengolah data penelitian dan lakukan analisis terhadap data penelitian.
15. Buat kesimpulan berdasarkan hasil analisis data penelitian.

Permesinan Milling Menggunakan Pahat End Mill dengan Variabel Helix Angle 40°/42°

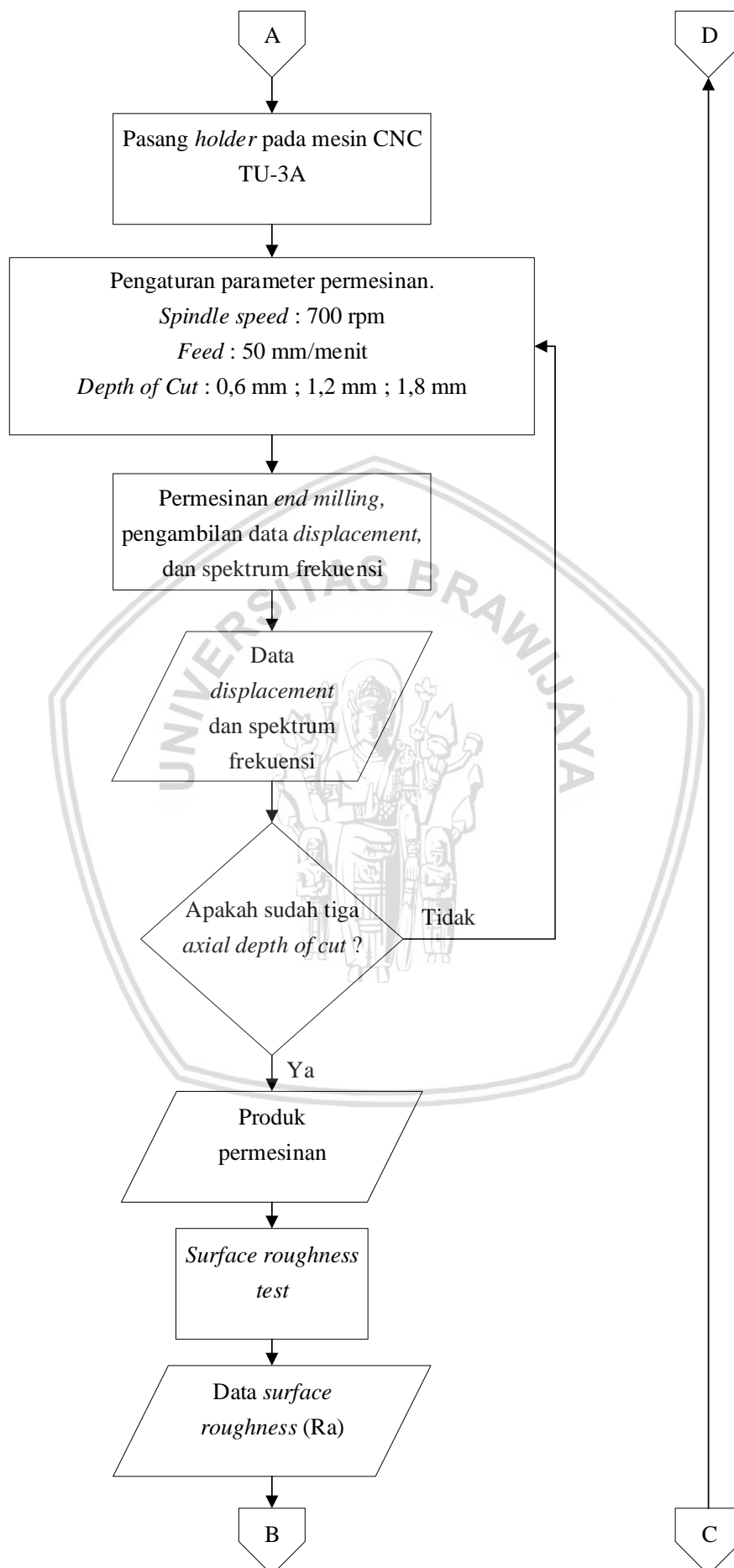
1. Siapkan alat dan bahan penelitian, berupa *end mill* dengan *helix angle* 40°/42°, *vibration meter*, Aluminium Alloy 2017.
2. Hubungkan *vibration meter* ke *software* LabView 2013, kemudian pasang *vibration meter* pada *spindle* mesin *milling* CNC TU-3A.
3. Beri tanda pada benda kerja Aluminium Alloy 2017 yang menandakan lima sampel permesinan menggunakan spidol. Jarak sampel pertama adalah 10 mm dari ujung benda kerja dimana permesinan dimulai, kemudian jarak setiap sampel selanjutnya adalah 8 mm.
4. Pasang benda kerja Aluminium Alloy 2017 pada ragum.
5. Masukkan pahat *end mill* dengan *helix angle* 40°/42° ke dalam *holder*.
6. Pasang *holder* pada mesin *milling* CNC TU-3A.
7. Lakukan pengaturan titik nol benda kerja.
8. Lakukan pengaturan parameter permesinan sesuai dengan variabel bebas dan variabel terkontrol permesinan.
9. Lakukan permesinan *end milling* benda kerja. *Export* data sampel spektrum frekuensi dari *software* LabView 2013 setiap pahat melewati garis sampel. Catat waktu pahat melewati setiap sampel dan waktu total pahat membuat satu *slot* dengan *stopwatch*. Setelah pahat selesai membuat satu *slot*, *export* data amplitudo *displacement* dari *software* LabView 2013.

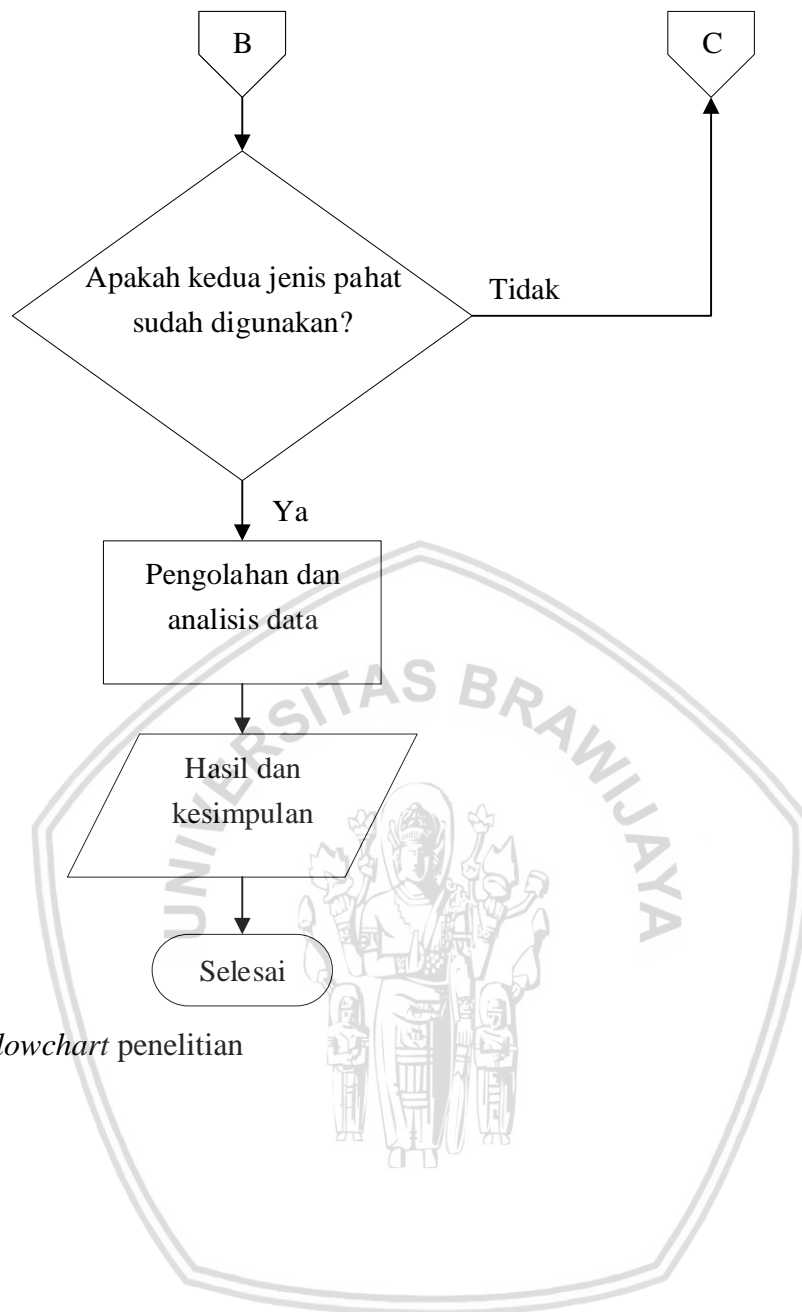
10. Lakukan langkah no.9 pada setiap level axial depth of cut.
11. Setelah permesinan selesai, lepaskan produk permesinan Aluminium Alloy 2017 dari ragum, kemudian beri identitas produk permesinan tersebut.
12. Lakukan pengukuran *surface roughness* (Ra) pada semua sampel produk permesinan Aluminium Alloy 2017.
13. Simpan data *surface roughness* (Ra).
14. Mengolah data penelitian dan lakukan analisis terhadap data penelitian.
15. Buat kesimpulan berdasarkan hasil analisis data penelitian.



3.8 Flowchart







Gambar 3.12 Flowchart penelitian

3.9 Analisis Statistik

3.9.1 Uji T

Uji T bertujuan untuk menguji hipotesis pengaruh variabel *helix angle* dibandingkan normal *helix angle* berdasarkan data penelitian dengan jumlah sampel di bawah 30. Uji T yang dilakukan adalah uji T satu arah dengan hipotesis H_0 dan H_1 sebagai berikut.

$$H_0 : \mu_{Ra \text{ variabel } helix \text{ angle}} = \mu_{Ra \text{ normal } helix \text{ angle}}$$

$$H_1 : \mu_{Ra \text{ variabel } helix \text{ angle}} < \mu_{Ra \text{ normal } helix \text{ angle}}$$

Uji T dilakukan dengan membandingkan nilai $T_{(hitung)}$ dengan $-T_{(alpha)}$. Apabila $T_{(hitung)}$ lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima dalam taraf kepercayaan sebesar $100\% - \alpha$, variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (R_a) yang lebih rendah dari normal *helix angle*.

Tabel 3.1

Rancangan Tabel Uji T

Uji T				
Avg.X1	Avg.X2	Avg.X1 - Avg.X2	T(hitung)	-T(alpha)
(Nilai rata-rata R_a , variabel <i>helix angle</i>)	(Nilai rata-rata R_a , normal <i>helix angle</i>)	(Avg.X1 - Avg.X2)	(Hasil perhitungan T(hitung))	(Nilai - T(alpha))

3.9.2 Analisis Regresi

Sebelum analisis regresi, persamaan non linear dijadikan persamaan linear melalui transformasi *double log*.

$$R_a = C \cdot a_p^{\beta_1} \cdot n^{\beta_2} \cdot v_f^{\beta_3}$$

$$R_a = \text{Surface roughness}$$

$$C = \text{Konstanta}$$

$$a_p = \text{Axial depth of cut}$$

$$n = \text{Spindle speed}$$

$$v_f = \text{Feed rate}$$

Persamaan tersebut menjadi linear sebagai berikut.

$$Y = \beta_1 X + \alpha$$

Dimana :

$$Y = \log R_a$$

$$X = \log a_p$$

$$\alpha = \log C + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f$$

Analisis regresi bertujuan untuk mengetahui korelasi antara *axial depth of cut* dan *surface roughness* (Ra). Pada analisis regresi dihitung nilai r_{xy} yang merupakan koefisien korelasi, β_1 yang merupakan *slope*, dan α yang merupakan *intercept*.

Tabel 3.2

Rancangan Tabel Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi

Regresi linear		
r_{xy}	Beta1	Alpha
(hasil perhitungan r_{xy})	(hasil perhitungan β_1)	(hasil perhitungan α)

Setelah itu dilakukan *analysis of variance* (anova) untuk menguji pengaruh persamaan regresi dalam keragaman total data. Pada anova terdapat hipotesis H_0 dan H_1 sebagai berikut.

$$H_0 : \sigma^2_{\text{regresi}} = \sigma^2_{\text{galat}}$$

$$H_1 : \sigma^2_{\text{regresi}} \neq \sigma^2_{\text{galat}}$$

Anova dilakukan dengan membandingkan $F_{(\text{hitung})}$ dengan $F_{(\text{tabel})}$. Apabila $F_{(\text{hitung})}$ lebih besar dari $F_{(\text{tabel})}$, maka hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima, persamaan regresi berpengaruh pada keragaman total data. Berdasarkan data tabel anova dihitung juga nilai koefisien determinasi (R^2) untuk mengetahui kesesuaian persamaan regresi.

Tabel 3.3

Rancangan Tabel Anova

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	$F_{(\text{hitung})}$ (KT (regresi) / KT (galat))	$F_{(\text{tabel})}$ (nilai F tabel)	R^2 (JK regresi / JK total)
Regresi	(nilai JK regresi)	(1)	(JK regresi / 1)			
Galat	(nilai JK galat)	(n - 2)	(JK galat / n-2)			
Total	(nilai JK total)	(n - 1)	(JK total / n-1)			

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Pada subbab ini ditampilkan tabel berisi data *surface roughness* (Ra) dengan satuan μm . Data *surface roughness* (Ra) didapat dari lima sampel pengukuran pada setiap *slot* dengan *axial depth of cut* berbeda yang merupakan hasil proses *end milling* menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. Kolom di sebelah kanan dari kelima sampel merupakan rata-rata dari kelima sampel tersebut.

Tabel 4.1

Data *Surface Roughness* (Ra) Hasil Penelitian

No.	Depth of Cut (mm)	Surface Roughness (Ra) Variabel Helix Agle (μm)	Rata-rata Ra (μm)	Surface Roughness (Ra) Normal Helix Agle (μm)	Rata-rata Ra (μm)
1	0,6	0,337	0,390	0,946	1,150
2		0,390		1,36	
3		0,394		0,878	
4		0,379		1,179	
5		0,451		1,389	
6	1,2	0,518	0,469	1,75	1,558
7		0,487		1,633	
8		0,477		1,631	
9		0,461		1,764	
10		0,404		1,014	
11	1,8	0,549	0,543	1,493	1,633
12		0,550		1,619	
13		0,544		1,419	
14		0,533		1,388	
15		0,540		2,245	

4.2 Uji T Pengaruh Variabel *Helix Angle* terhadap *Surface Roughness* (Ra)

Uji T dilakukan untuk mengetahui pengaruh pahat variabel *helix angle* melalui perbandingan dengan pahat normal *helix angle*. Uji T dilakukan pada setiap level *axial depth of cut*. Taraf kepercayaan yang digunakan pada uji T sebesar 95%.

Pada uji T ditetapkan hipotesis H_0 dan hipotesis tandingan berupa H_1 . Penerimaan hipotesis H_0 menyatakan pahat variabel *helix angle* tidak menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang secara nyata lebih kecil dari pahat normal *helix angle*. H_0 dapat ditolak ketika nilai $T_{\text{(hitung)}}$ lebih kecil dari $-T_{\text{(alpha)}}$ dengan α sebesar 5%.

$$H_0 : \mu_{\text{Ra variabel helix angle}} = \mu_{\text{Ra normal helix angle}}$$

H_1 : μ Ra variabel *helix angle* < μ Ra normal *helix angle*

1. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 0,6 mm

Tabel 4.2

Uji T *Axial Depth of Cut* 0,6 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,390	1,15	-0,760	-7,18	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 0,6 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

2. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 1,2 mm

Tabel 4.3

Uji T *Axial Depth of Cut* 1,2 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,469	1,56	-1,09	-7,77	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 1,2 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 1,2 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

3. Uji T pada *Axial Depth of Cut* 1,8 mm

Tabel 4.4

Uji T *Axial Depth of Cut* 1,8 mm

Uji T				
Avg.X ₁	Avg.X ₂	Avg.X ₁ - Avg.X ₂	T(hitung)	-T(alpha)
0,543	1,63	-1,09	-6,89	-1,86

Pada uji T *axial depth of cut* 1,8 mm didapat $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{(alpha)}$.

Hipotesis H_0 ditolak sehingga hipotesis H_1 diterima, menyatakan bahwa penggunaan pahat variabel *helix angle* menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan pahat normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 1,8 mm dengan taraf kepercayaan 95%.

4.3 Analisis Regresi

Analisis regresi dilakukan untuk mengetahui korelasi antara variabel bebas *axial depth of cut* dengan variabel terikat *surface roughness* (R_a) pada pahat variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. *Surface roughness* (R_a) memiliki fungsi yang dipengaruhi *axial depth of cut* (a_p), *spindle speed* (n), dan *feed rate* (v_f). Fungsi tersebut dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut.

$$R_a = C \cdot a_p^{\beta_1} \cdot n^{\beta_2} \cdot v_f^{\beta_3}$$

Dimana:

R_a = *Surface roughness*

C = Konstanta

a_p = *Axial depth of cut*

n = *Spindle speed*

v_f = *Feed rate*

$\beta_{1,2,3}$ = pangkat dari masing-masing variabel

Persamaan tersebut berhubungan non linear, sehingga dilakukan transformasi logaritma *double log*, sebagai berikut.

$$\log R_a = \log C + \beta_1 \log a_p + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f$$

Spindle speed dan *feed rate* bernilai konstan, sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\log C + \beta_2 \log n + \beta_3 \log v_f = \text{konstan} = \alpha$$

maka

$$\log R_a = \beta_1 \log a_p + \alpha$$

Untuk mempermudah analisis regresi, persamaan tersebut diubah menjadi sebagai berikut.

$$Y = \beta_1 X + \alpha$$

Dimana :

$$Y = \log R_a$$

$$X = \log a_p$$

Setelah dilakukan analisis regresi, persamaan di atas dikembalikan ke persamaan logaritma, kemudian ke persamaan non linear.

4.3.1 Analisis Regresi Pengaruh *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness* (Ra) pada Pahat Normal *Helix Angle*

Tabel 4.5

Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Normal *Helix Angle*

Regresi linear		
r_{xy}	$Beta1$	$Alpha$
0,613	0,332	0,136

Melalui analisis regresi didapat r_{xy} yang bernilai 0,613. Nilai r_{xy} menyatakan pada penggunaan pahat normal *helix angle*, variabel bebas *axial depth of cut* berpengaruh terhadap *surface roughness* (Ra) sebesar 61,3%, sedangkan 38,7 % dipengaruhi variabel lain. Persamaan linear yang didapat melalui analisis regresi adalah:

$$Y = 0,332 X + 0,135$$

Persamaan tersebut dikembalikan ke bentuk logaritma asalnya, sehingga didapat persamaan sebagai berikut.

$$\log R_a = 0,332 \log a_p + 0,135$$

Persamaan transformasi logaritma *double log* kemudian dikembalikan ke bentuk awal persamaan non linear, sebagai berikut.

$$R_a = 1,37 \cdot a_p^{0,332}$$

Tabel 4.6

Anova Regresi Normal *Helix Angle*

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}	R^2
Regresi	0,064	1	0,064	7,817	4,67	0,376
Galat	0,107	13	0,00819			
Total	0,171	14	0,0122			

Hasil anova didapat $F_{(hitung)}$ yang lebih besar dari $F_{(tabel)}$. Hal tersebut menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness* (Ra). Nilai R^2 menyatakan kesesuaian model persamaan linear *axial depth of cut* 0,6 mm – 1,8 mm terhadap *surface roughness* (Ra) pada pahat normal *helix angle* sebesar 37,6%.

4.3.2 Analisis Regresi Pengaruh *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness* (Ra) pada Pahat Variabel *Helix Angle*

Tabel 4.7

Korelasi dan Koefisien pada Persamaan Regresi Variabel *Helix Angle*

Regresi linear		
r_{xy}	$Beta1$	$Alpha$
0,882	0,301	-0,346

Melalui analisis regresi didapat r_{xy} yang bernilai 0,882. Nilai r_{xy} menyatakan pada penggunaan pahat variabel *helix angle*, variabel bebas *axial depth of cut* berpengaruh terhadap *surface roughness* (R_a) sebesar 88,2%, sedangkan 11,8% dipengaruhi variabel lain. Persamaan linear yang didapat melalui analisis regresi adalah:

$$Y = 0,301X - 0,346$$

Persamaan tersebut dikembalikan ke bentuk logaritma asalnya, sehingga didapat persamaan sebagai berikut.

$$\log R_a = 0,301 \log a_p - 0,346$$

Persamaan transformasi logaritma *double log* kemudian dikembalikan ke bentuk awal persamaan non linear, sebagai berikut.

$$R_a = 0,450 \cdot a_p^{0,301}$$

Tabel 4.8

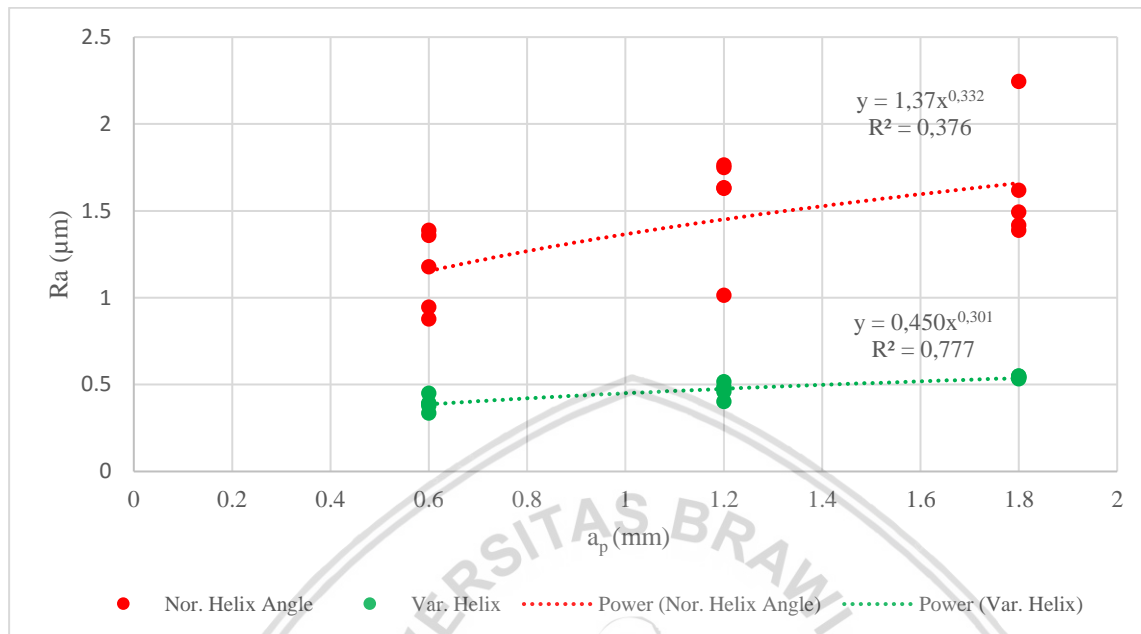
Anova Regresi Variabel *Helix Angle*

Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}	R^2
Regresi	0,0528	1	0,0528	45,3	4,67	0,777
Galat	0,0151	13	0,00116			
Total	0,0679	14	0,00485			

Hasil anova didapat $F_{(hitung)}$ yang lebih besar dari $F_{(tabel)}$. Hal tersebut menyatakan persamaan regresi linear berperan dalam keragaman data *surface roughness* (R_a). Nilai R^2 menyatakan kesesuaian model persamaan linear *axial depth of cut* 0,6 mm – 1,8 mm terhadap *surface roughness* (R_a) pada pahat variabel *helix angle* sebesar 77,7%.

4.4 Grafik dan Pembahasan

4.4.1 Grafik dan Pembahasan Pengaruh Variabel *Helix Angle* dan *Axial Depth of Cut* terhadap *Surface Roughness* (Ra)



Gambar 4.1 Grafik hasil analisis regresi pengaruh variabel *helix angle* dan *axial depth of cut* terhadap *surface roughness* (Ra)

Gambar 4.1 memperlihatkan hasil regresi hubungan variabel bebas *axial depth of cut* pada pemakanan menggunakan pahat variabel *helix angle* dan normal *helix angle*. Pada sumbu X terdapat parameter *axial depth of cut* dengan satuan mm dan pada sumbu Y terdapat parameter *surface roughness* (Ra) dengan satuan μm . Titik berwarna merah dan garis titik berwarna merah menunjukkan data aktual sampel hasil pemakanan menggunakan normal *helix angle* dan garis persamaan non linear hasil regresi. Titik berwarna hijau dan garis titik berwarna hijau menunjukkan hasil aktual sampel pemakanan menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* dan garis persamaan non linear hasil regresi.

Pada grafik didapat informasi bahwa permesinan menggunakan pahat dengan variabel *helix angle* menghasilkan produk dengan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dibandingkan permesinan menggunakan pahat dengan normal *helix angle*. Meningkatnya *axial depth of cut* meningkatkan nilai *surface roughness* (Ra). Pahat dengan normal *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm; 1,2mm; 1,8 mm, menghasilkan rata-rata *surface roughness* 1,150 μm ; 1,558 μm ; 1,632 μm . Pahat dengan variabel *helix angle* pada *axial depth of cut* 0,6 mm; 1,2mm; 1,8 mm, menghasilkan rata-rata *surface roughness* 0,390 μm ; 0,469 μm ; 0,543 μm .

Pahat dengan variabel *helix angle* menyebabkan *pitch angle* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan (persamaan (2-10)), menyebabkan perbedaan *tooth passing frequency* pada setiap mata pahat bersebelahan (persamaan (2-12) dan (2-13)), sehingga pahat variabel *helix angle* dapat mencegah terjadinya resonansi (persamaan (2-6) dan (2-8)). Proses permesinan yang terhindar dari resonansi, menyebabkan amplitudo *displacement* getaran yang lebih rendah pada saat proses pemakanan sehingga menghasilkan produk dengan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah.

Nilai *axial depth of cut* yang semakin tinggi meningkatkan *cutting force* (persamaan (2-4)). Nilai *cutting force* yang semakin tinggi meningkatkan amplitudo *displacement* getaran. *Displacement* getaran meninggalkan bekas pada permukaan benda kerja saat permesinan, sehingga pada amplitudo *displacement* yang lebih tinggi didapat *surface roughness* (Ra) yang lebih tinggi.

Pada pahat variabel *helix angle*, koefisien determinasi sebesar 77,7% menunjukkan kesesuaian persamaan non linear hasil regresi yang tinggi. Keadaan berbeda terdapat pada pahat normal *helix angle*, dimana koefisien determinasi hanya sebesar 37,6%. Hal tersebut dikarenakan terdapat korelasi yang rendah antara *axial depth of cut* dan *surface roughness* (Ra) pada keadaan resonansi, yaitu sebesar 61,3%. Korelasi yang rendah mengindikasikan bahwa keadaan resonansi pada pahat normal *helix angle*, terdapat variabel lain yang tidak dapat dikontrol saat penelitian dan berpengaruh pada *surface roughness* (Ra). Salah satu variabel yang tidak dapat dikontrol dan berpengaruh secara signifikan pada keadaan resonansi adalah frekuensi aktual yang terjadi saat permesinan, dimana frekuensi pada aktual permesinan tidak dapat dikontrol untuk bernilai tetap dan konstan. Pembahasan lebih lanjut pengaruh variabel *helix angle* dibandingkan dengan normal *helix angle* dengan dasaran grafik data aktual berupa grafik *surface roughness* (Ra), amplitudo *displacement*, dan spektrum frekuensi pada salah satu sampel di setiap level *axial depth of cut* yang didapat dari pengukuran pada penelitian dibahas pada subbab selanjutnya.

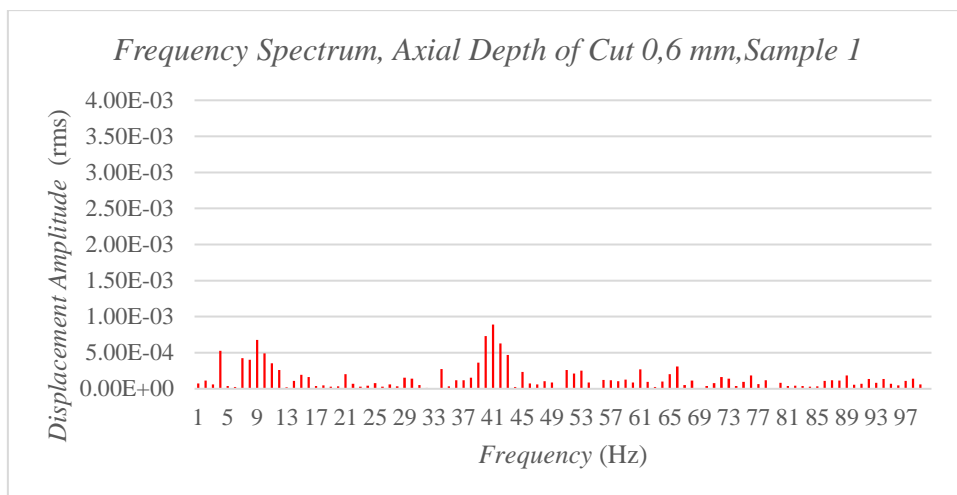
4.4.2 Grafik dan Pembahasan *Surface Roughness* (Ra), Amplitudo *Displacement*, dan Spektrum Frekuensi pada *End Milling* Menggunakan Variabel *Helix Angle* dan Normal *Helix Angle*

Pada subbab ini ditampilkan dan dibahas grafik untuk memperkuat pembahasan pada subbab sebelumnya. Pada setiap level *axial depth of cut* dan penggunaan jenis pahat berbeda ditampilkan satu sampel untuk mempermudah pembahasan, dimana masing-masing sampel tersebut terdapat tiga jenis grafik, yaitu grafik *surface roughness* (Ra), grafik amplitudo

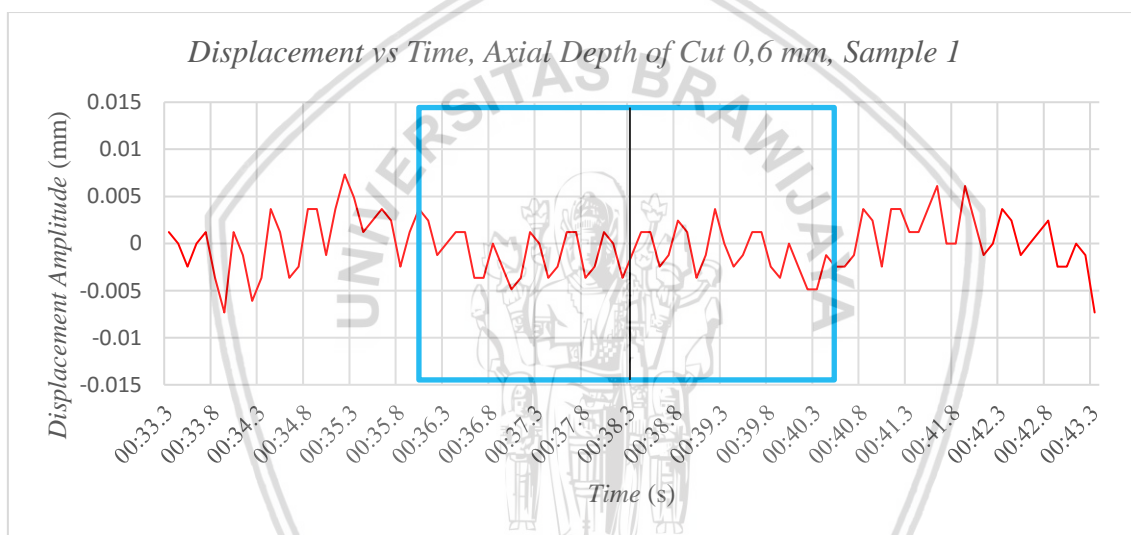
displacement, dan grafik spektrum frekuensi. Grafik *surface roughness* (Ra) (Gambar 4.4, 4.7, 4.10, 4.13, 4.16, 4.19) menunjukkan profil permukaan produk permesinan yang dihasilkan dari pengukuran *surface roughness tester*.

Grafik amplitudo *displacement* pada Gambar 4.3, 4.6, 4.9 4.12, 4.15, 4.18 menunjukkan *displacement* yang diterima sensor *vibration meter* yang kemudian diproses *software* LabView 2013. *Vibration meter* membaca data amplitudo *displacement* pada *spindle* mesin yang dipengaruhi oleh *displacement* pahat. Sumbu X menunjukkan parameter waktu dengan satuan detik atau sekon (s) dan sumbu Y menunjukkan parameter amplitudo *displacement* dengan satuan mm. Grafik berwarna merah merupakan permesinan dengan normal *helix angle*, sedangkan grafik berwarna hijau merupakan permesinan dengan variabel *helix angle*. Persegi panjang dengan garis keliling berwarna biru muda merupakan rentang pengukuran *surface roughness*. Garis vertikal berwarna hitam merupakan waktu pengukuran spektrum frekuensi.

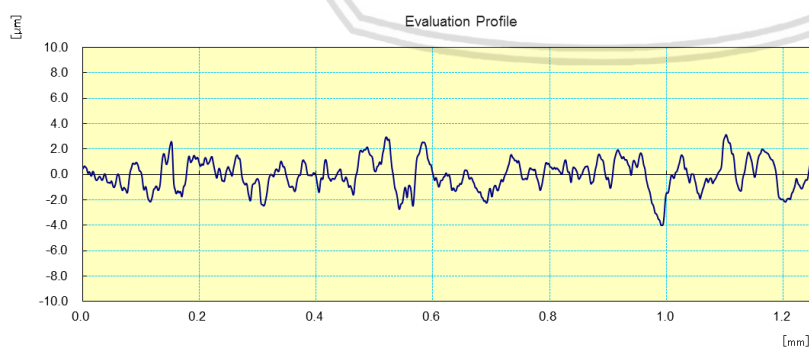
Grafik spektrum frekuensi pada Gambar 4.2, 4.5, 4.8, 4.11, 4.14, 4.17 merupakan hasil proses FFT pada *software* LabView 2013. Sumbu X pada grafik menunjukkan persebaran frekuensi dengan satuan Hz. Sumbu Y pada grafik menunjukkan nilai rms (*root mean square*) amplitudo *displacement*. Setelah enam grafik dengan nomor sampel dan *axial depth of cut* yang sama namun dengan jenis pahat berbeda ditampilkan, dilakukan pembahasan terhadap pengaruh pahat variabel *helix angle* dibandingkan normal *helix angle*. Di akhir pembahasan terdapat tabel yang berisi informasi rentang waktu pengambilan data, nilai rms amplitudo *displacement*, dan *surface roughness* (Ra) seluruh lima sampel dari masing-masing jenis pahat.



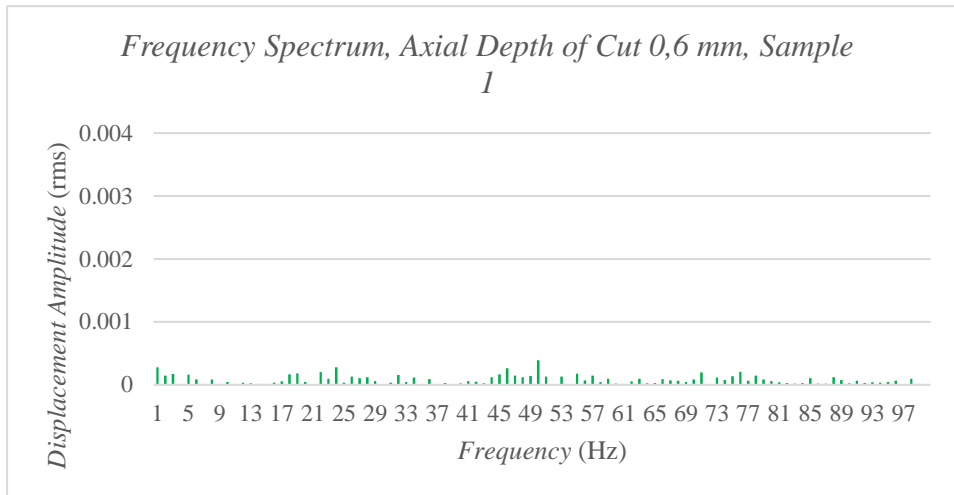
Gambar 4.2 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



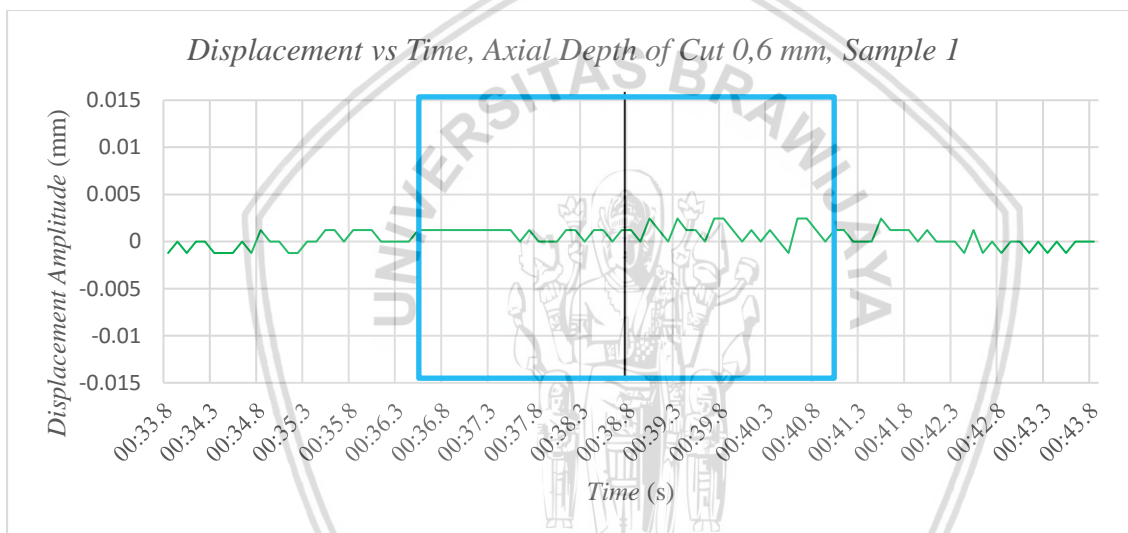
Gambar 4.3 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



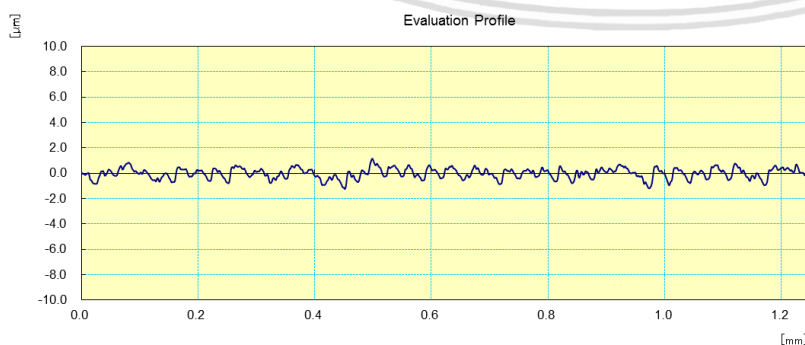
Gambar 4.4 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.5 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.6 Grafik amplitudo displacement pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm



Gambar 4.7 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 0,6 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.4) dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo displacement yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu terdapat pada rentang 40-42 Hz. Frekuensi di sekitar 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo displacement yang cukup tinggi dikarenakan terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi di setiap mata pahat pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 pada gambar 4.4. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo displacement yang tinggi, yaitu pada frekuensi 40-42 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo displacement pada *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.6. Pengambilan data amplitudo displacement *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 diambil pada rentang waktu 00:33,3 – 00:43,3, memiliki nilai rms sebesar 0,00292 mm. Amplitudo displacement yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 0,946 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 pada Gambar 4.7 menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo displacement yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensi. Gambar 4.6 menunjukkan grafik amplitudo displacement pada *axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 yang diambil pada rentang waktu 00:33,8 – 00:43,8 memiliki nilai rms amplitudo displacement yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu 0,00109 mm. Amplitudo displacement yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,337 μm , mengalami reduksi sebesar 64,38%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

Tabel 4.9

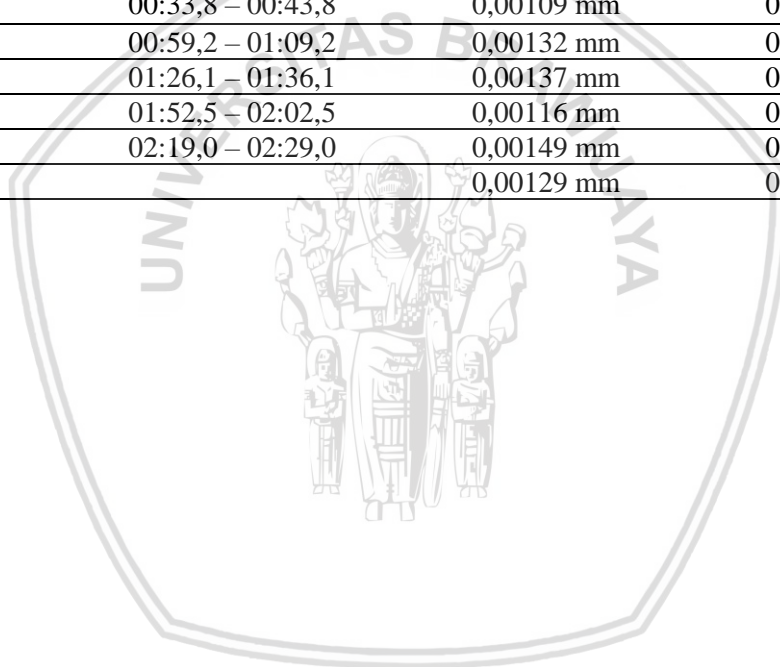
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, Axial Depth of Cut 0,6 mm, Sampel 1-5

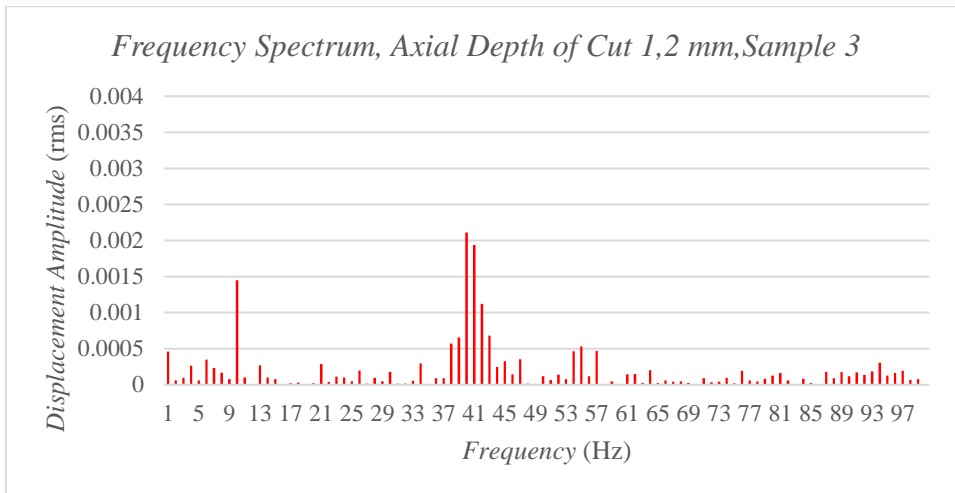
Normal <i>Helix Angle</i> Axial Depth of Cut 0,6 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:33,3 – 00:43,3	0,00292 mm	0,946 μm
Sampel 2	01:01,4 – 01:01,4	0,00323 mm	1,36 μm
Sampel 3	01:31,8 – 01:41,8	0,00286 mm	0,878 μm
Sampel 4	01:54,8 – 02:04,8	0,00300 mm	1,179 μm
Sampel 5	02:19,9 – 02:29,9	0,00314 mm	1,389 μm
Rata-rata		0,00303 mm	1,150 μm

Tabel 4.10

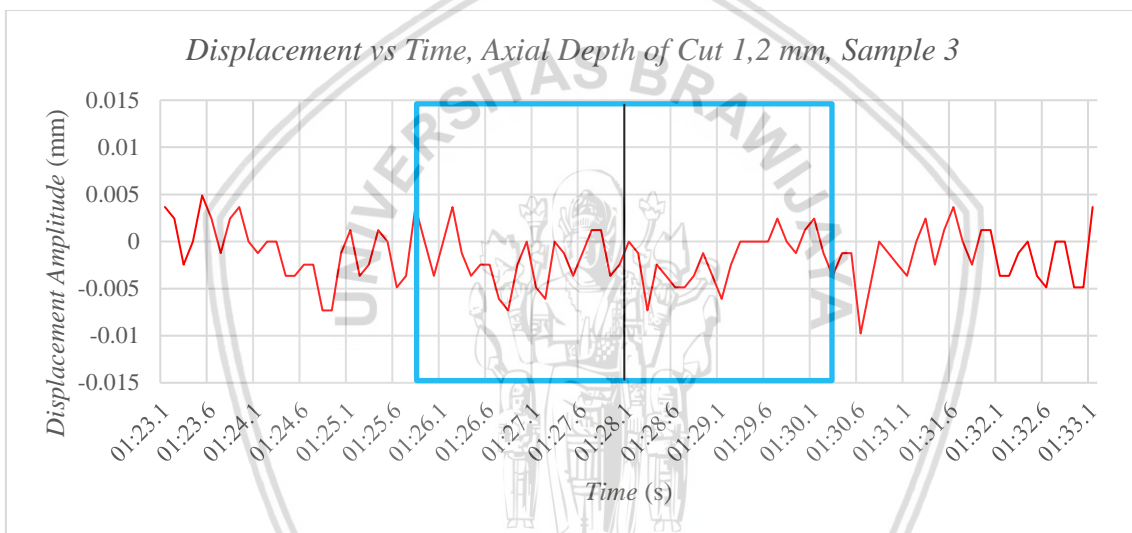
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, Axial Depth of Cut 0,6 mm, Sampel 1-5

Variabel <i>Helix Angle</i> Axial Depth of Cut 0,6 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:33,8 – 00:43,8	0,00109 mm	0,337 μm
Sampel 2	00:59,2 – 01:09,2	0,00132 mm	0,390 μm
Sampel 3	01:26,1 – 01:36,1	0,00137 mm	0,394 μm
Sampel 4	01:52,5 – 02:02,5	0,00116 mm	0,379 μm
Sampel 5	02:19,0 – 02:29,0	0,00149 mm	0,451 μm
Rata-rata		0,00129 mm	0,390 μm

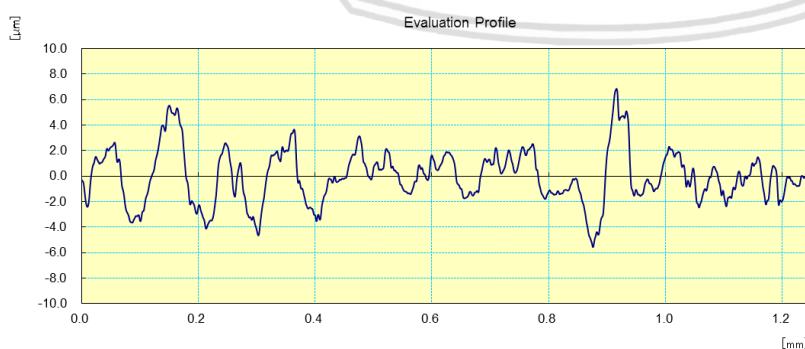




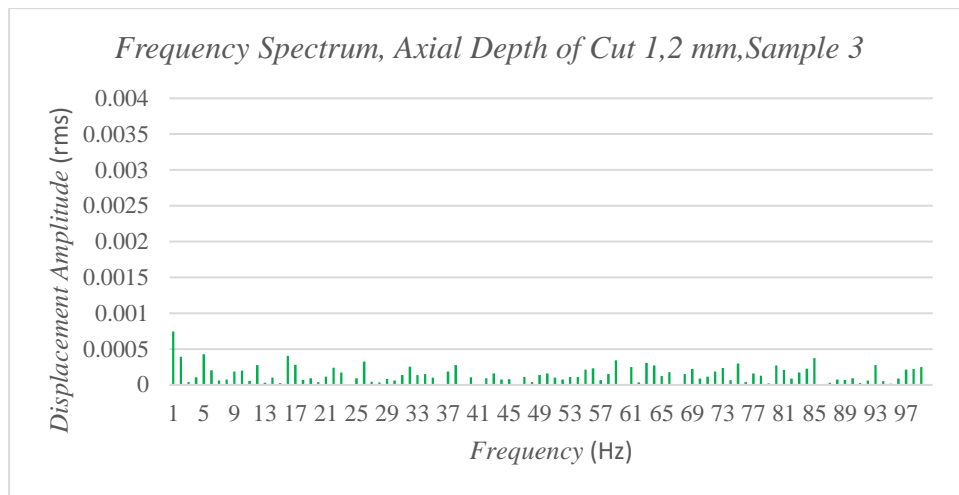
Gambar 4.8 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



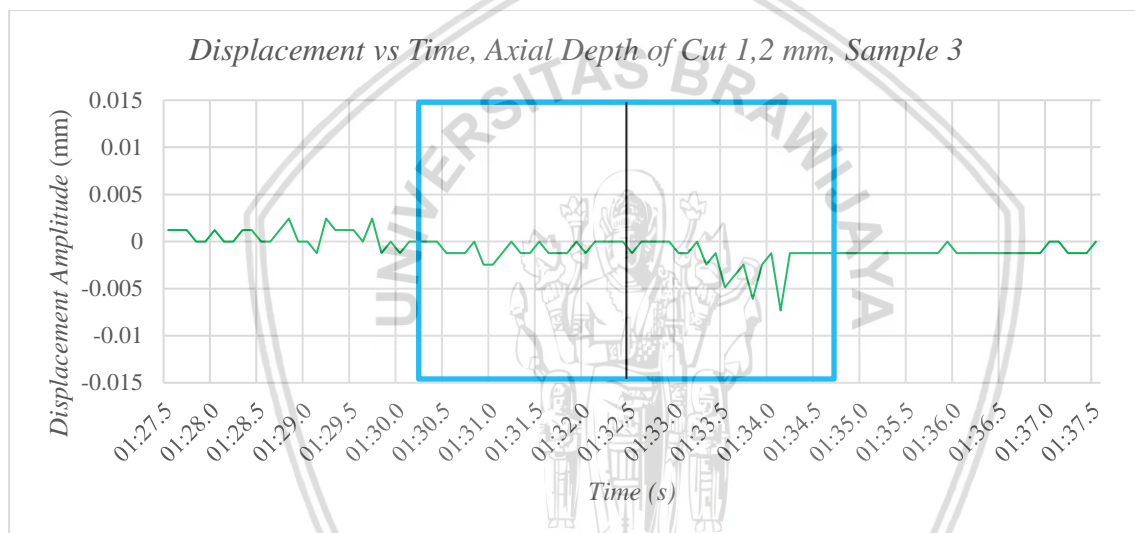
Gambar 4.9 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



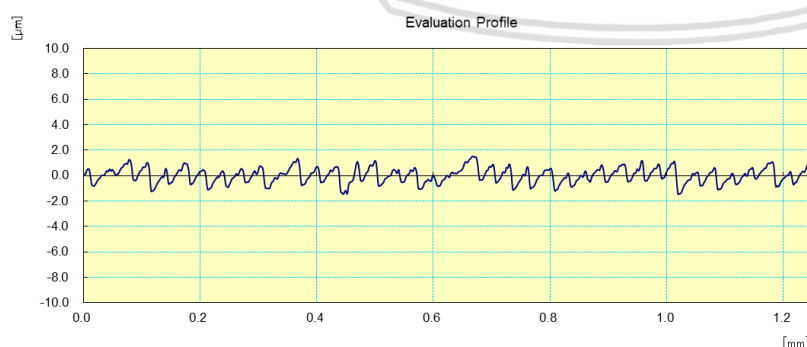
Gambar 4.10 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.11 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.12 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm



Gambar 4.13 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,2 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.10), dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu terdapat pada rentang frekuensi 40-41 Hz. Frekuensi pada 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang cukup tinggi disebabkan terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan setiap mata pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 pada gambar 4.10. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang tinggi, yaitu pada rentang frekuensi 40-41 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.9. Pengambilan data amplitudo *displacement axial depth of cut* 0,6 mm sampel 1 diambil pada rentang waktu 01:23,1 – 01:33,1, memiliki nilai rms sebesar 0,00327 mm. Amplitudo *displacement* yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 1,631 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 (gambar 4.13) menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensinya. Gambar 4.12 menunjukkan grafik amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,2 mm sampel 3 yang diambil pada rentang waktu 01:27,5 – 01:37,5 memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu 0,00161 mm. Amplitudo *displacement* yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,477 μm , mengalami reduksi sebesar 70,75%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

.

Tabel 4.11

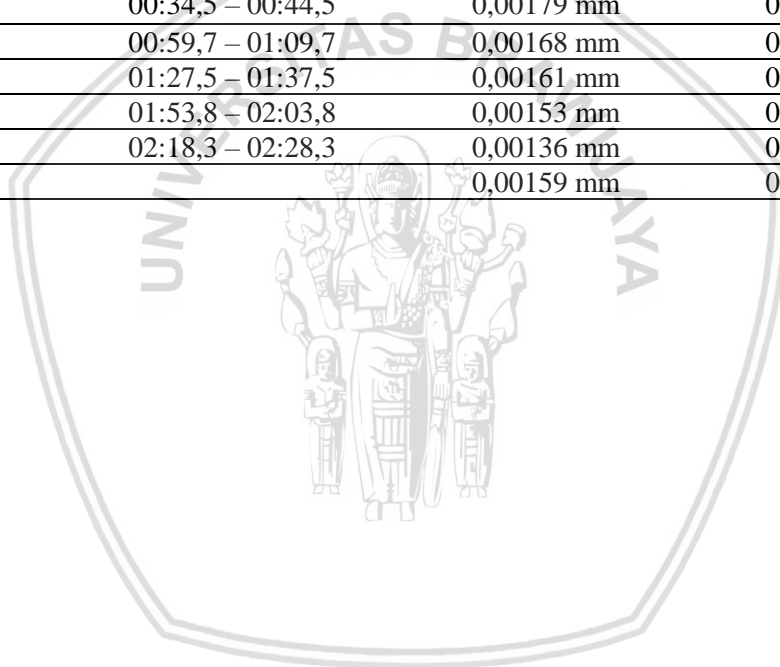
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,2 mm, Sampel 1-5

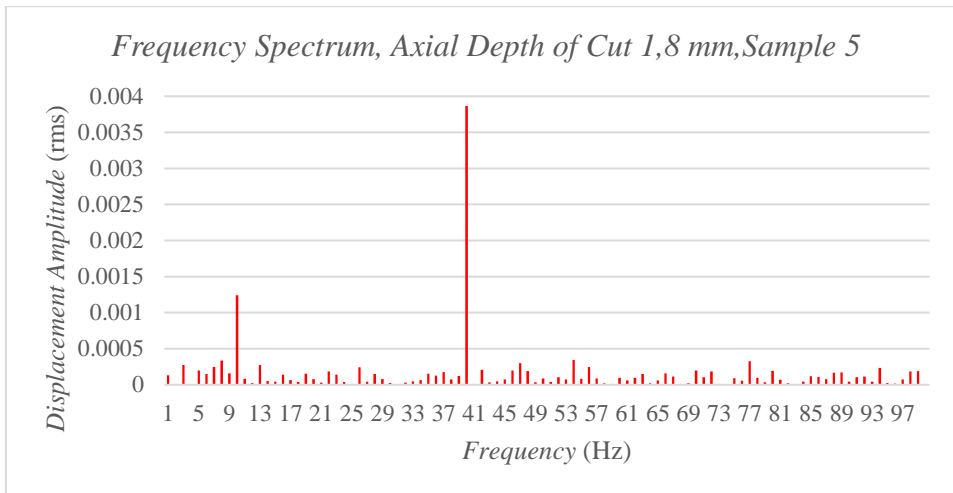
Normal <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:31,0 – 00:40,0	0,00341 mm	1,75 μm
Sampel 2	00:56,1 – 01:06,1	0,00333 mm	1,633 μm
Sampel 3	01:23,1 – 01:33,1	0,00327 mm	1,631 μm
Sampel 4	01:47,1 – 01:57,1	0,00356 mm	1,764 μm
Sampel 5	02:13,2 – 02:23,2	0,00308 mm	1,014 μm
Rata-rata		0,00333 mm	1,558 μm

Tabel 4.12

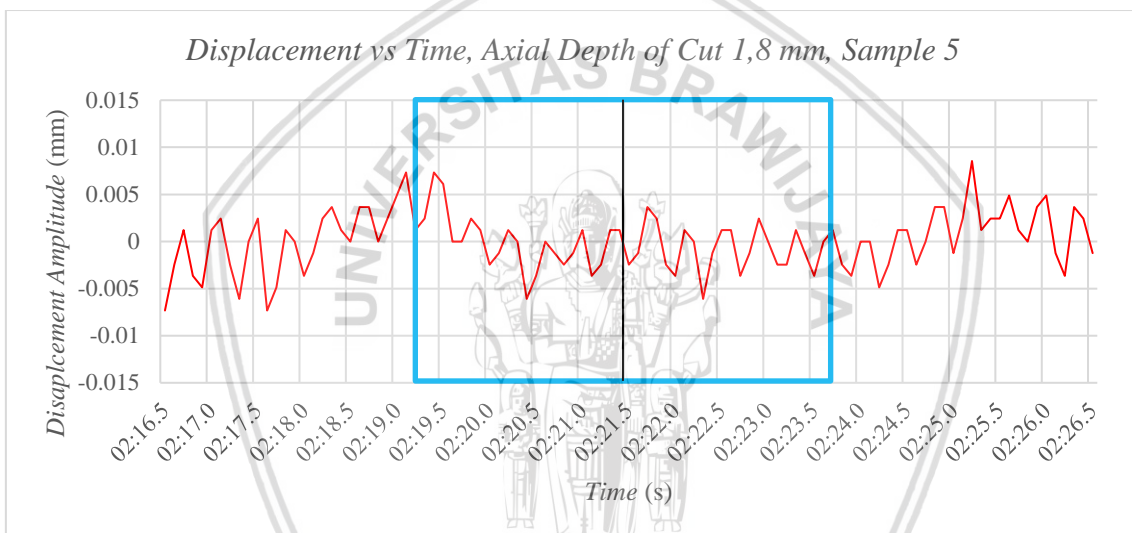
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,2 mm, Sampel 1-5

Variabel <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,2 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:34,5 – 00:44,5	0,00179 mm	0,518 μm
Sampel 2	00:59,7 – 01:09,7	0,00168 mm	0,487 μm
Sampel 3	01:27,5 – 01:37,5	0,00161 mm	0,477 μm
Sampel 4	01:53,8 – 02:03,8	0,00153 mm	0,461 μm
Sampel 5	02:18,3 – 02:28,3	0,00136 mm	0,404 μm
Rata-rata		0,00159 mm	0,469 μm

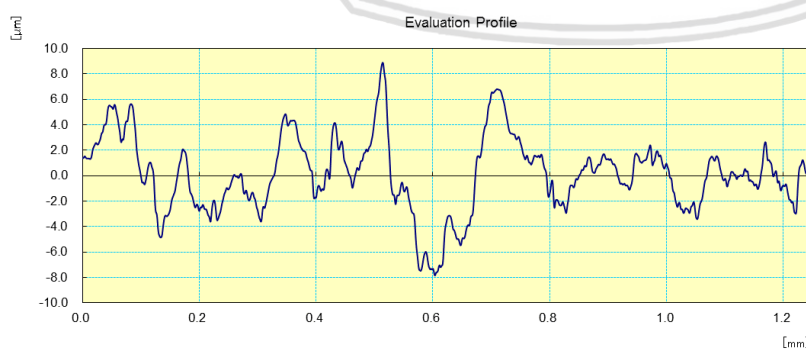




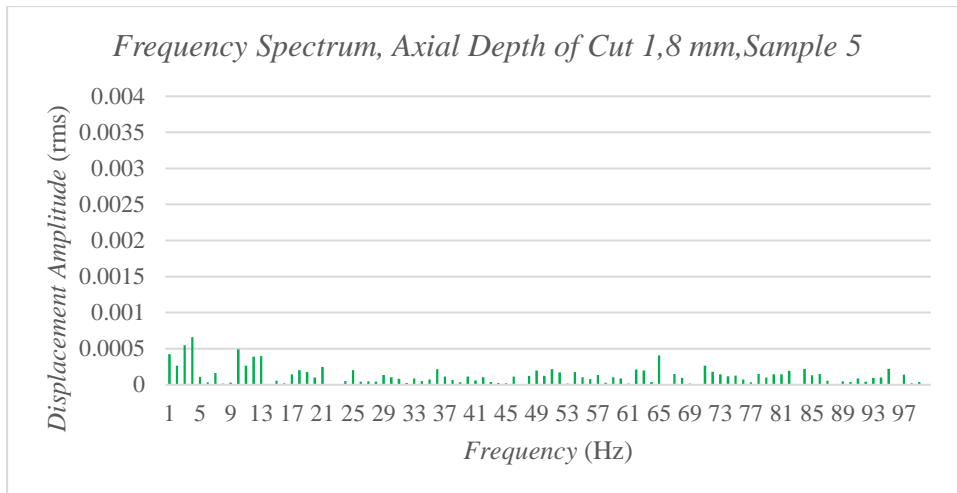
Gambar 4.14 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



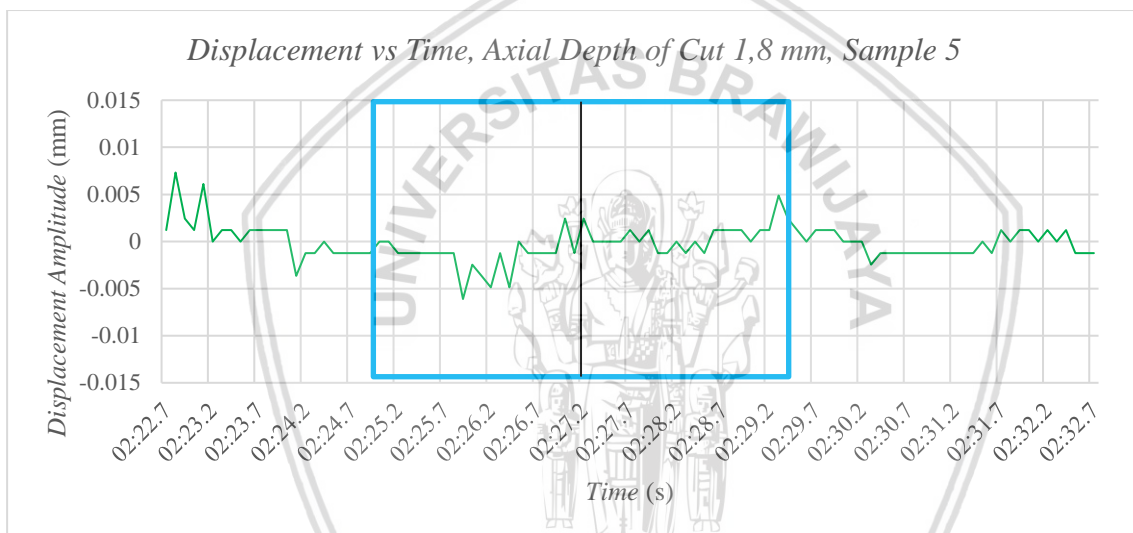
Gambar 4.15 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



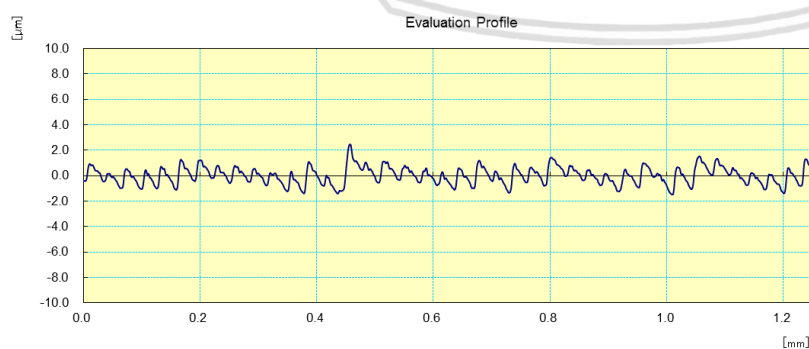
Gambar 4.16 *Surface roughness* (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat normal *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.17 Grafik spektrum frekuensi pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.18 Grafik amplitudo *displacement* pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm



Gambar 4.19 Surface roughness (Ra) pada *end milling* menggunakan pahat variabel *helix angle* dengan *axial depth of cut* 1,8 mm

Resonansi terjadi ketika perbandingan antara frekuensi natural dan *tooth passing frequency* memiliki perbandingan *integer*. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-8). Frekuensi natural pada proses permesinan dapat dilihat pada grafik spektrum frekuensi (gambar 4.16), dimana frekuensi natural memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih tinggi dari frekuensi lainnya, yaitu pada frekuensi 40 Hz. Frekuensi pada 10 Hz merupakan frekuensi *spindle speed*, memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang cukup tinggi terkena dampak resonansi.

Permesinan menggunakan pahat normal *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang sama di setiap mata pahat. Hal tersebut menjadikan setiap mata pahat normal *helix angle* memiliki kecenderungan terkena resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Resonansi dapat terlihat pada grafik spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 pada gambar 4.16. Terdapat frekuensi yang memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang tinggi, yaitu pada frekuensi 40 Hz. Resonansi menyebabkan amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 memiliki nilai tinggi, seperti yang terlihat pada gambar 4.15. Pengambilan data amplitudo *displacement axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 diambil pada rentang waktu 02:16,5 – 02:26,5, memiliki nilai rms sebesar 0,00363 mm. Amplitudo *displacement* yang tinggi menyebabkan bekas pada permukaan produk permesinan, menghasilkan *surface roughness* (Ra) sebesar 2,245 μm .

Permesinan dengan pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan. Hal tersebut membuat pahat variabel *helix angle* dapat terhindar dari resonansi pada *spindle speed* 600 rev/min. Spektrum frekuensi *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 (gambar 4.19) menunjukkan frekuensi pada permesinan menggunakan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang rendah dan cenderung merata pada setiap frekuensinya. Gambar 4.18 menunjukkan grafik amplitudo *displacement* pada *axial depth of cut* 1,8 mm sampel 5 yang diambil pada rentang waktu 02:22,7 – 02:32,7 memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu 0,00189 mm. Amplitudo *displacement* yang lebih rendah menghasilkan *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari pahat normal *helix angle*, yaitu sebesar 0,543 μm , mengalami reduksi sebesar 75,8%. Hasil dari sampel lainnya dapat dilihat pada kedua tabel di halaman berikutnya.

Tabel 4.13

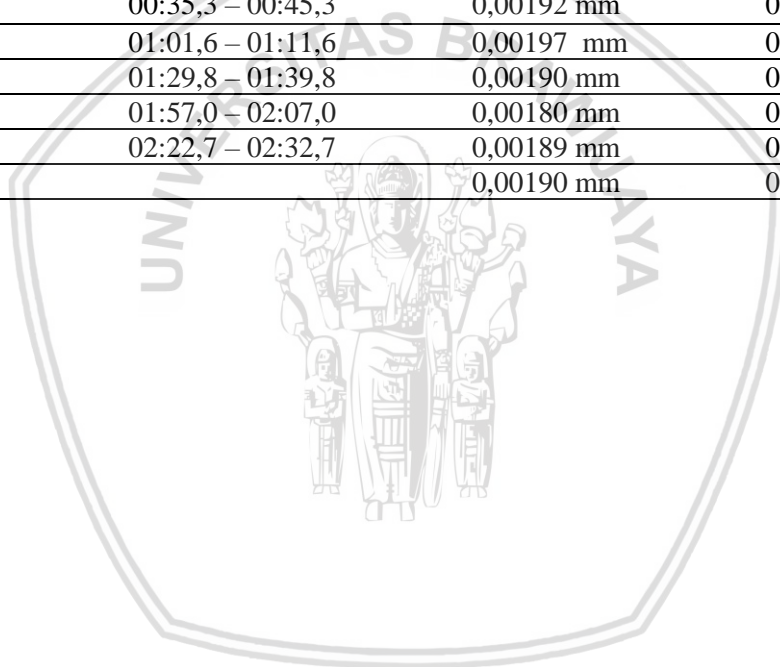
Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Normal *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,8 mm, Sampel 1-5

Normal <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm			
	Selang Waktu (menit: detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface</i> <i>Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:31,9 – 00:41,9	0,00328 mm	1,493 μm
Sampel 2	00:55,7 – 01:05,7	0,00333 mm	1,619 μm
Sampel 3	01:23,1 – 01:33,1	0,00320 mm	1,419 μm
Sampel 4	01:49,1 – 01:59,1	0,00312 mm	1,388 μm
Sampel 5	02:16,5 – 02:26,5	0,00363 mm	2,245 μm
Rata-rata		0,00331 mm	1,633 μm

Tabel 4.14

Selang Waktu Pengambilan Data, Amplitudo *Displacement*, dan *Surface Roughness* (Ra) Pahat Variabel *Helix Angle*, *Axial Depth of Cut* 1,8 mm, Sampel 1-5

Variabel <i>Helix Angle</i> <i>Axial Depth of Cut</i> 1,8 mm			
	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo <i>Displacement</i> (rms)	<i>Surface</i> <i>Roughness</i> (Ra)
Sampel 1	00:35,3 – 00:45,3	0,00192 mm	0,549 μm
Sampel 2	01:01,6 – 01:11,6	0,00197 mm	0,550 μm
Sampel 3	01:29,8 – 01:39,8	0,00190 mm	0,544 μm
Sampel 4	01:57,0 – 02:07,0	0,00180 mm	0,533 μm
Sampel 5	02:22,7 – 02:32,7	0,00189 mm	0,540 μm
Rata-rata		0,00190 mm	0,543 μm



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pahat variabel *helix angle* memiliki *tooth passing frequency* yang berbeda pada setiap mata pahat bersebelahan sehingga dapat mencegah resonansi. Proses permesinan tanpa resonansi menyebabkan pahat variabel *helix angle* memiliki nilai rms amplitudo *displacement* yang lebih rendah, menghasilkan nilai *surface roughness* (Ra) yang lebih rendah dari normal *helix angle*. *Axial depth of cut* yang semakin tinggi dapat meningkatkan *cutting force* sehingga meningkatkan amplitudo *displacement* pahat, meninggalkan bekas pada permukaan produk permesinan dan meningkatkan *surface roughness* (Ra). Peningkatan *surface roughness* (Ra) pada pahat variabel *helix angle* memiliki persamaan regresi yang berbeda dengan pahat normal *helix angle*. Pahat normal *helix angle*, memiliki persamaan non linear $R_a = 1,37 \cdot a_p^{0,332}$. Pahat variabel *helix angle*, memiliki persamaan non linear $R_a = 0,450 \cdot a_p^{0,301}$.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya dapat meneliti pahat variabel *helix angle* dengan sudut yang berbeda.
2. Penelitian selanjutnya dapat meneliti pahat jenis variabel *pitch angle*, kemudian membandingkannya dengan variabel *helix angle* dan normal *helix angle*.
3. Penelitian selanjutnya dapat meneliti jenis pahat lain selain *end mill*, seperti *ball nose*, *twist drill*, dan *roughing cutter*.



DAFTAR PUSTAKA

- Bhushan, Bharat et. al. (2013). *Chapter 2, Surface Roughness Analysis and Measurement Technique*. The Ohio State University.
- Boothroyd, Geoffrey & Winston. et. al. (1989). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Kingston : University of Rhode Island.
- Budak, E. (2016) et. al. *Modeling Dynamics And Stability of Variable Pitch and Helix Milling Tools For Development Of A Design Method to Maximize Chatter Stability*. Istanbul: Manufacturing Research Laboratory, Sabanci University.
- Groover, Mikell . (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process, and Systems*. Lehigh University.
- Kashyapi, Gautam et. al. (2015). *Formation of Stability Lobe Diagram (SLD) for Chatter Free Milling on Aluminium Alloy*. India: Department of Mechanical Engineering, Government College.
- Kelly, S. Graham et. al. (2012). *Mechanical Vibrations Theory and Applications*. USA: The University of Akron.
- Lacerda, B.H et. al. (2004). *Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling*. Uberlandia: Federal University of Uberlândia.
- Munoa, J. (2016) et. al. *Chatter Suppression Techniques In Metal Cutting*. Basque Country: Dynamics & Control Department, Elgoibar.
- Niu, Jinbo. (2017) et. al. *Mechanics and Multi-Regenerative Stability of Variable Pitch and Variable Helix Milling Tools Considering Runout*. Shanghai : Shanghai Jiao Tong University.
- Pejryd, L. (2016) et. al. *Minimization of Chatter in Machining by The Use of Mobile Platform Technologies*. Sweden: University West.
- Wang, Yong et. al. (2015). *Chatter Prediction for Variable Pitch and Variable Helix Milling*. China: Tianjin University.
- Yusoff, Ahmad et. al. (2010). *Optimisation of Variable Helix Tool Geometry for Regenerative Chatter Mmitigation*. Malaysia : Universiti Malaysia Pahang.